

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**Magnetické vlastnosti typových konstrukčních
materiálů – analýza magnetických vlastností ocelí
určité třídy**

**Magnetic properties of types construction materials –
analyses of magnetic properties of steel of types grade**

Prohlášení

„Mistopřísežně prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě, dne 4.5. 2011

.....

Petr Keller

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Markovi, Ph.D., za poskytnutí odborné pomoci a zázemí pro vypracování této diplomové práce.

Abstrakt

První část práce byla zaměřena na seznámení s obecnou strukturou látek, především pak ocelí. Dále jsou zde podrobně popsány jednotlivé způsoby žihání.

Druhá část práce byla věnována nelegovaným (uhlíkovým) ocelím a jejich rozdělení do jednotlivých tříd.

V třetí části je pak popsáno rozdělení látek podle jejich magnetických vlastností na dia, para a feromagnetické. V této části jsou rovněž uvedeny některé materiály, které mají normami zaručené magnetické vlastnosti.

Poslední část je zaměřena na zjištění magnetických vlastností vzorků oceli určité třídy.

Klíčová slova

Nelegované oceli, magneticky měkké materiály, binární diagram, feromagnetismus, hysterezní smyčka, magnetování, žihání.

Abstract

The first part of this work is focused on introducing with general material structure, especially steels. Next separate kinds of annealing are also described in this work.

The second part was dedicated to unalloyed (carbonic) steels and their dividing to separated grades.

In the third part is described dividing materials according to their magnetic properties on dia, para and ferromagnetic. In this part there are some materials, which have got guaranteed magnetic properties in standards.

The final part is focused on determining of magnetic properties of steel samples of types grade.

Key words

Unalloyed steels, soft magnetic materials, binary diagram, ferromagnetism, hysteresis loop, magnetizing, annealing.

Obsah

Úvod.....	1
1 Struktura a vlastnosti ocelí	2
1.1 Struktura kovů.....	2
1.1.1 Zotavování a rekrystalizace.....	4
1.1.2 Tvorba krystalů	4
1.1.3 Překrystalizace a modifikace.....	5
1.2 Binární diagramy.....	6
1.2.1 Rovnovážný diagram železo-uhlík	7
1.3 Body přeměny	9
1.3.1 Diagramy IRA	10
1.3.2 Diagramy ARA	11
1.4 Žihání oceli	12
1.4.1 Žihání bez překrystalizace	13
1.4.2 Žihání s překrystalizací	14
2 Konstrukční nelegované oceli.....	18
2.1 Nelegované tvářené oceli obvyklých jakostí a na zušlechťování.....	19
2.2 Automatové oceli	23
2.3 Oceli na hluboký tah.....	24
2.4 Nelegované oceli na odlitky.....	25
3 Magnetické vlastnosti látek	26
3.1 Diamagnetické látky.....	27
3.2 Paramagnetické látky.....	28
3.3 Feromagnetické materiály.....	29
3.3.1 Magneticky měkké materiály	30
3.3.2 Magneticky tvrdé materiály	32
3.4 Metody měření magnetických vlastností ocelí.....	33
3.4.1 Měření na toroidu	34
4 Analýza magnetických vlastností vzorků oceli určité třídy	37
4.1 Cíle měření.....	37
4.2 Příprava vzorků	38
4.3 Měřicí přístroj Remagraph – C500.....	39
4.4 Vlastní měření	40

5 Závěr	57
6 Použitá literatura	58
7 Seznam příloh	59

Úvod

V dnešní době se bez magnetických materiálů neobejde téměř žádné elektrické zařízení. Většina elektrických strojů či přístrojů (jističe, stykače, relé, transformátory, stejnosměrné či střídavé elektromotory, atd.) obsahuje magnetické obvody nebo prvky, na kterých je fungování daného zařízení závislé.

Pro různé aplikace se od magnetických materiálů ať už měkkých či tvrdých požadují rozdílné magnetické vlastnosti. Magneticky měkké i magneticky tvrdé materiály jsou většinou slitiny různých kovů. Jsou-li od nich vyžadovány velmi dobré magnetické vlastnosti (u magneticky tvrdých materiálů to může být například velká koercitivní síla či remanence), vyrábějí se z poněkud drahých kovů (Co, V, W, Ag, Mo, atd.). V současnosti není mnoho platných norem, které by uváděly přesné požadavky na magnetické vlastnosti materiálů a ocelí. Většinou se uvádí pouze chemické složení oceli, maximální pevnost v tahu či doporučené použití. Magnetické vlastnosti je proto třeba zjistit měřením vzorku dané třídy oceli.

Jednou z možností je výběr oceli ze skupiny nelegovaných (uhlíkových) ocelí. Tyto oceli nejsou legovány žádnými přídavnými prvky, a proto by měly být relativně levné vůči ocelím vyšších tříd.

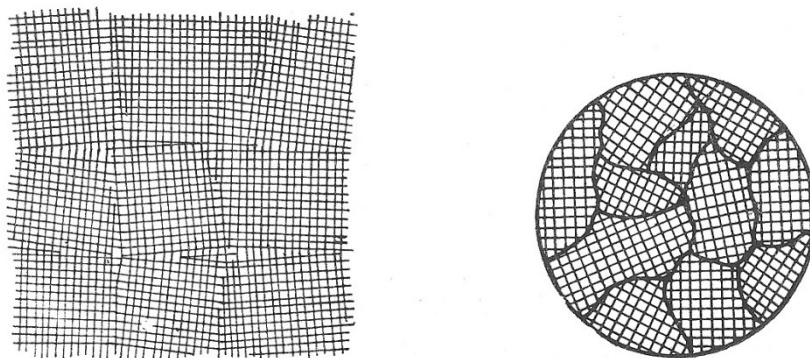
1 Struktura a vlastnosti ocelí

1.1 Struktura kovů

Atomy veškerých látek jsou tvořeny *atomovým jádrem*, ve kterém je soustředěna téměř veškerá hmota atomu. Atomové jádro obsahuje jak kladně nabitě částice (protony), tak částice neutrální (neutrony). Protony a neutrony se označují společným názvem – nukleony. Kolem atomového jádra obíhají záporně nabitě částice (elektrony). Tyto částice se pohybují v prostoru, který se nazývá *elektronový obal*. Počet protonů atomu je roven počtu elektronů, díky tomu je atom navenek neutrální.

Atomy kovů vytvářejí v prostoru různé obrazce, které se periodicky opakují. Tomuto pravidelnému seskupení atomů se říká *prostorová mřížka*. Základní stavební jednotkou mřížky je *elementární buňka*. Elementární buňky mívají velmi malé rozměry. Kupříkladu kovový krystal o velikosti 1 mm^3 obsahuje řádově 10^{20} elementárních buněk. Na schematickém znázornění prostorové mřížky jsou v místě průsečíků přímek umístěny atomy kovů. V podstatě existuje 14 typů prostorových mřížek, které jsou odvozeny ze čtyř základních (prostá, bazálně centrovaná, plošně centrovaná a prostorově centrovaná mřížka).

Ve skutečnosti krystaly kovů nemají tak dokonale se opakující skladbu atomů, ale vyskytují se v ní různé nedokonalosti a nepravidelnosti. I když v kovu s poměrně vysokou koncentrací různých poruch, které vznikají například při tváření za studena, jich na tisíc atomů ve správné poloze nepřipadá více než jedna, mají druh, množství a rozložení poruch značný vliv na některé vlastnosti kovových krystalů (např. pevnost, tvárnost, rychlost a dokonalost přeměny).

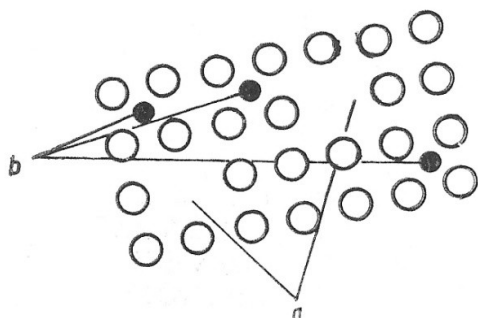


Obr. 1 – Mozaiková struktura monokrystalu (vlevo)
a zrna polykrystalu (vpravo)

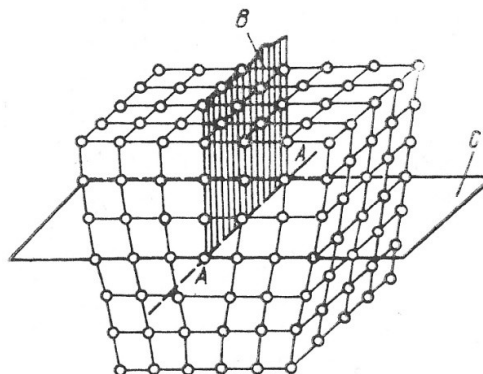
Dokonalým krystalům se nejvíce blíží *monokrystaly*. Jde o tělesa, která jsou v celém svém objemu tvořena pouze jediným krystalem. Stavba těchto krystalů však také není dokonalá. Monokrystaly jsou tvořeny tzv. *bloky* (nazývány také *subzrna*). Vnitřní stavbu těchto bloků lze považovat prakticky za dokonalou. Jsou velmi malých rozměrů, největší z nich měří asi jednu tisícinu milimetru a jsou od sebe navzájem odděleny *subhranicemi*. Tyto bloky jsou vůči sobě mírně dezorientovány (pouze však několik sekund či minut obloukové míry), a jelikož tvoří strukturu, která se podobá mozaice, nazývá se struktura monokrystalu *mozaiková struktura*.

Ocel je však tvořena *zrny*. Jde o velké množství malých krystalů, které mají taktéž mozaikovou strukturu, avšak na rozdíl od jejich vnitřní stavby se zrna navzájem liší orientací, tvarem i velikostí. Takovýto typ materiálu, který obsahuje větší množství zrn, se nazývá *polykrystalický*.

Poruchy kovových krystalů jsou tedy odchylky od pravidelné krystalické struktury. Tyto poruchy mohou být rozděleny podle původu na poruchy strukturní a poruchy chemické. Strukturní poruchy zahrnují odchylky od přísně geometrického uspořádání v uzlových bodech krystalických mřížek, kdežto u poruch chemických je periodičnost struktury krystalu porušena atomy cizích prvků. V metalografii se však poruchy dělí podle prostorového rozmístění na *poruchy bodové, čarové a plošné*.



Obr. 2 – Bodové poruchy v mřížce kovu
a – vakance, b - intersticiály



Obr. 3 – Hranová dislokace

Mezi bodové poruchy patří *vakance a intersticiální atomy*. Vakance je prázdný (neobsazený) uzlový bod v mřížce a intersticiální atomy jsou pak částice vyskytující se mezi normálními polohami atomů.

Čárovým poruchám, které jsou způsobeny vysunutím atomů z pravidelných poloh, se říká *dislokace*.

Hranice bloků (subzrn), hranice zrn a vrstvené chyby se potom řadí k poruchám plošným.

Nejdůležitější a pro chování kovů nejvýznamnější poruchou jsou dislokace. Ty mohou vznikat již při tuhnutí roztaveného kovu nebo při růstu zrn či subzrn. Se zvětšujícím se úhlem mezi dvěma směry atomových mřížek se zvětšuje počet vzniklých dislokací. Dislokace mohou rovněž vznikat ze shluků vakantních míst. Největší množství dislokací však vzniká při pohybu dislokací při plastické (nevratné) deformaci.

Důležitá je zde hustota dislokací. Ta je vyjádřena součtem délek jednotlivých dislokací v krychlovém centimetru. Hustota dislokací v kovu vyžíhaném na měkko je přibližně 10^5 až 10^8 cm^{-2} . Po tváření za studena vzroste tato hodnota zhruba na dvojnásobek.

Dislokace mají schopnost pohybovat se. Celá dislokace se může pohybovat buď stejnou rychlostí, kdy nemění svůj tvar, nýbrž pouze svou polohu, nebo se mohou jednotlivé části dislokace pohybovat různou rychlostí. V tomto případě mění dislokace nejen svou polohu, ale i tvar.

Při plastické deformaci dochází k tomu, že dislokace postupují směrem k povrchu materiálu a jejich hustota se zvětšuje. Při hustotě dislokací asi 10^7 cm^{-2} , což je hustota dobře vyžíhaných kovů, je pevnost kovu minimální. Pokud je kov následně tvářen za studena, hustota

dislokací se zvětšuje a kov se zpevňuje. V poslední době bylo zjištěno, že pevnost kovů stoupá také, jestliže dojde ke snížení hustoty pod kritickou mez. Proto mají monokrystaly kovů (whiskery) i při malém množství dislokací vysokou pevnost (čisté železo až 14000 MPa).

Při zvětšení množství dislokací nad kritickou mez se pevnost kovu zvyšuje a jeho plastická deformace probíhá obtížněji. Toto deformační zpevnění zvýší pevnost, tvrdost a mez kluzu kovu, avšak tažnost a houževnatost klesá. Tvářením se jednotlivá zrna protahují ve směru tváření. Dochází k usměrňování jejich krystalografických os v jednom směru a vzniká tzv. textura. Mechanické vlastnosti materiálu při tomto uspořádání jsou v různých směrech různé a tento jev se pak nazývá *anizotropie mechanických vlastností*.

1.1.1 Zotavování a rekrytalizace

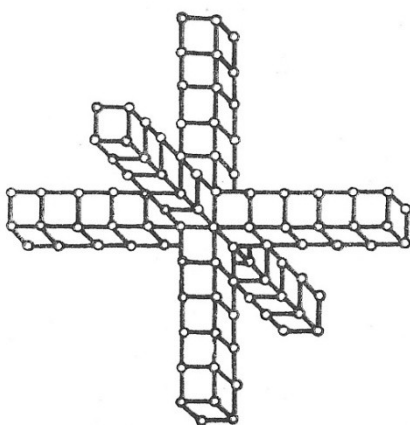
Deformovaný kov je termodynamicky nestabilní a má tendenci vrátit se do stavu s atomovou mřížkou s menším množstvím dislokací a pravidelněji uspořádanou, tedy do stavu stabilnějšího. Se zvýšením teploty kovu tvářeného za studena nad určitou mez dochází k *zotavování* kovu a s dalším zvyšováním teploty pak nastává *rekrytalizace*.

K zotavení kovů tvářených za studena dochází relativně za nízkých teplot, tedy zhruba při teplotách jedné třetiny až jedné čtvrtiny teploty tavení daného kovu. Potřebný čas výdrže na této teplotě je velice krátký. Zotavením se v podstatě nemění mechanické vlastnosti, stejně tak zůstává stejná i mikrostruktura kovu (velikost i tvar zrn). Dochází však ke snižování vnitřního pnutí a zlepšují se některé fyzikální vlastnosti (např. elektrická vodivost). Důvodem bývá uvolnění nepohyblivých dislokací, snížení jejich počtu a změna jejich uspořádání.

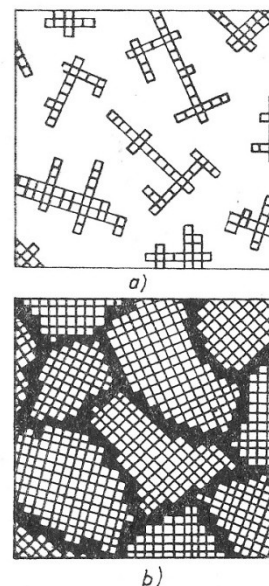
Pokud se kov tvářený za studena zahřeje na teplotu vyšší než je teplota zotavení, pak dochází k rekrytalizaci. Na hranicích zrn a subzrn se vytvářejí zárodky nových zrn, ze kterých rostou nová zrna. Když se jejich hranice začnou vzájemně dotýkat, je jejich růst ukončen. Nově vzniklá zrna nejsou protažená ve směru tváření jako zrna původní a mají tedy pravidelnější tvar. Vlastnosti kovu po rekrytalizaci se podobají vlastnostem před tvářením za studena.

1.1.2 Tvorba krystalů

Je-li jakýkoliv kov roztaven při dostatečně vysoké teplotě, lze jej považovat za zcela stejnorodý (homogenní). Obsahuje pouze vyzdívky tavicí pece či nekovové vměstky. Navíc u každého kovu nebo slitiny kovů v tekutém stavu jsou fyzikální vlastnosti ve všech směrech stejné. Takovou látku je možno nazvat *izotropní*.



Obr. 4 – Schematické znázornění počátku vzniku krystalu



Obr. 5 – Růst krystalu v tavenině
a – počátek, b – před ukončením

Pokud je kov ochlazen na teplotu tuhnutí, kov přechází do tuhého stavu. Tato teplota se u různých kovů liší. Tento děj, při kterém se kov mění z kapalného skupenství na pevné, je vždy spojen s krystalizací. Tavenina však netuhne v celém svém objemu najednou, ale v tavenině se nejdříve začínají tvořit krystalizační zárodky, které potom dále narůstají na úkor taveniny, až tavenina celá zmizí. Při růstu jednotlivých krystalů dochází k nárazům na sousední krystaly a tím je jejich růst v daném směru ukončen. To je příčinou nepravidelného tvaru jednotlivých zrn.

Krystal začíná růst z místa zárodku (nukleace) a roste tak, že nejprve se utvoří tři hlavní osy budoucího krystalu a poté na těchto osách postupně narůstají osy vedlejší. Tato fáze, která se podobá stromu (řecky *dendros*), se nazývá *dendrit*. Teprve až potom se vyplňuje prostor mezi osami dendritu a dochází ke vzniku celých krystalů. Tyto krystaly mají poněkud nepravidelný tvar a nazývají se *zrna*. Zrna jsou pak tvořena *subzrny* neboli *bloky*. Kovy v tuhém stavu mohou mít na rozdíl od kapalného stavu, ve kterém jsou kovy izotropní, v různých směrech rozdílné vlastnosti a to především mechanické. Této vlastnosti se říká *anizotropie*. Anizotropické vlastnosti mívají kovy, které byly tvářeny (válcovány nebo taženy). Deformací jejich zrn a nehomogenit došlo k vytvoření vláknité struktury. Výjimku tvoří monokrystaly, které jsou izotropní.

1.1.3 Překrystalizace a modifikace

Následným ochlazováním již ztuhlého kovu může při určité teplotě dojít u některých kovů ke změně krystalické mřížky. Tato přeměna se nazývá polymorfní nebo alotropická přeměna, při které se zrna s jedním typem krystalové mřížky mění na nová zrna s jiným typem krystalové mřížky. Nemění se ovšem pouze mřížka, ale také zrno, kdy zpravidla dochází k jeho zjemnění. Tento proces se nazývá *překrystalizace*. Ve struktuře kovů se proto rozlišuje *zrno primární*, které se vytvořilo při tuhnutí taveniny, a *zrno sekundární*, které se vytváří až v tuhém stavu. Krystaly jednoho kovu mohou mít tedy různou strukturu krystalových mřížek. Tyto rozdílné struktury se nazývají *modifikace* a značí se řeckými písmeny α , β , γ , δ atd.

Ochlazováním se při určité teplotě mění jedna modifikace v druhou, avšak při následném ohřevu se mění opět druhá v první. Změna modifikace je tedy vratná.

U slitin probíhají procesy jako nukleace a následná tvorba dendritů obdobně jakou u čistých kovů. Taktéž zde probíhají změny modifikace jednoho či druhého kovu. Důležité je však to, jestli jsou tyto kovy v tuhém roztoku vzájemně rozpustné, nebo je jejich rozpustnost omezena. Mohou však také navzájem vytvářet chemické sloučeniny. Pokud jsou dva kovy v tuhém stavu rozpustné, tvoří spolu tzv. *tuhé roztoky*. Jde o homogenní krystalickou fázi, jejíž vnitřní struktura má prostorovou mřížku základního kovu (rozpuštědla) a kromě atomů tohoto kovu obsahuje i atomy rozpuštěného kovu. Tuhé roztoky se potom rozdělují podle způsobu umístění atomů rozpuštěného kovu v prostorové mřížce základního kovu na *tuhé roztoky substituční a intersticiální*.

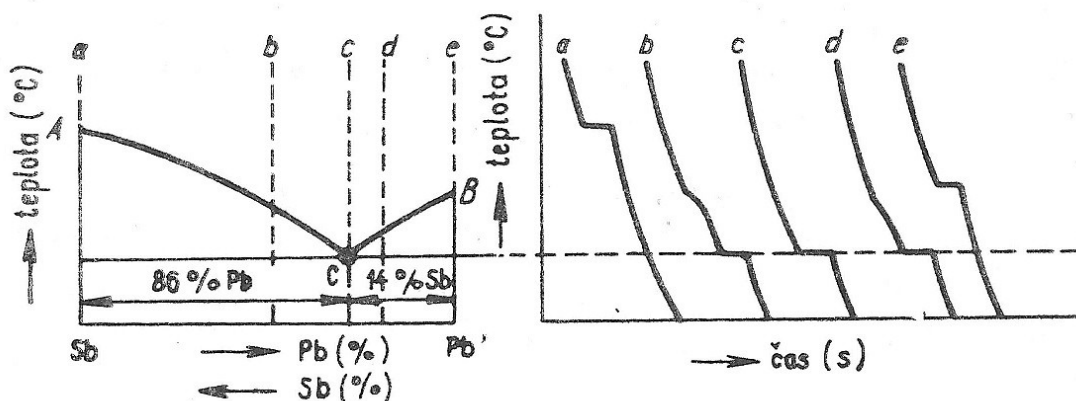
Jestliže mají atomy slitinového prvku a základního kovu podobnou velikost a vlastnosti, potom se mohou vzájemně zastupovat a vzniká tedy substituční tuhý roztok.

Pokud jsou atomy slitinového prvku malé a vyskytují-li se mezi atomy základního kovu, vzniká tuhý roztok intersticiální. Čím jsou větší rozdíly ve velikosti atomů obou kovů, tím je rozpustnost větší.

Dále může vznikat tzv. *intermediální fáze*, které mají v převážné většině podobu chemických sloučenin.

1.2 Binární diagramy

Typů binárních diagramů je větší množství. Binární rovnovážný diagram zpravidla vyjadřuje, jak se slitina v daném poměru obou kovů chová při jejím tuhnutí či ohřevu a jaké její fáze při tom vznikají. Je zřejmé, že slitiny kovů mohou být tvořeny dvěma a více prvky. Binární diagram však lze sestavit pouze pro slitiny dvou kovů. Tento diagram se znázorňuje do roviny. U slitin tvořených třemi kovy lze sestavit diagram tetrární, který už se ovšem znázorňuje do prostoru. Je již však značně složitý. Pro slitiny s více než třemi kovy nelze sestavit žádný diagram.



Obr. 6 – Binární diagram dvou vzájemně neomezeně rozpustných kovů v kapalném stavu a nerozpustných v tuhém stavu

a, b, c, d, e – ochlazovací křivky pro dané slitiny

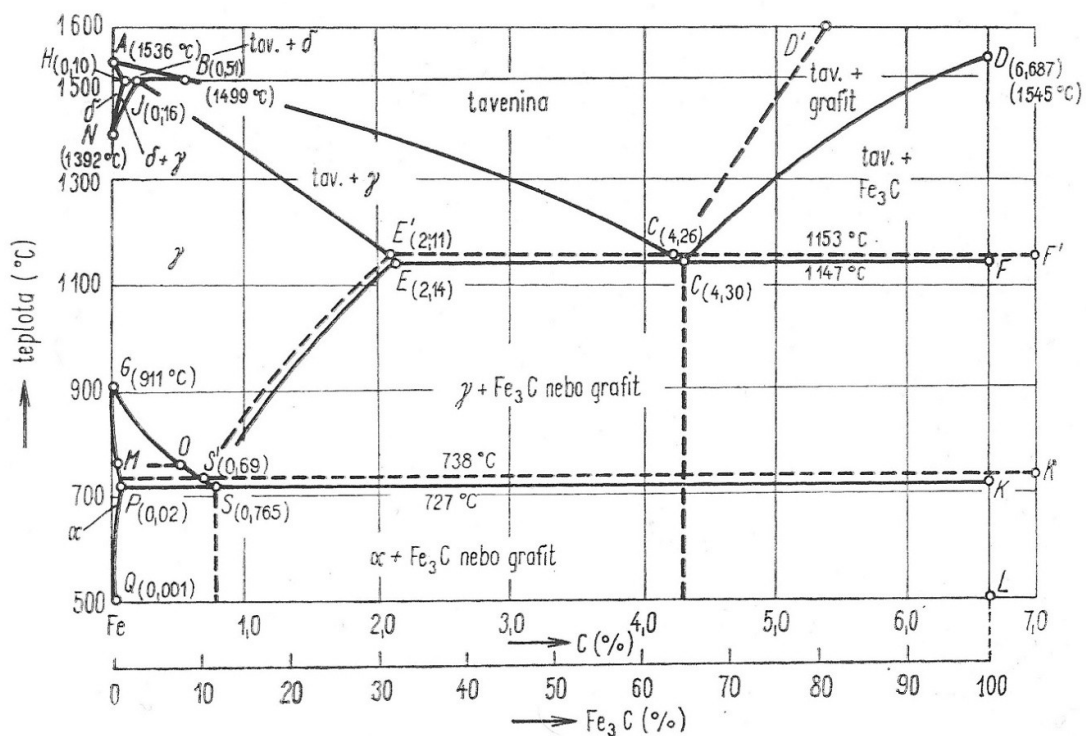
Na vodorovnou osu levé strany diagramu se vynáší prvek A, jehož koncentrace je nejprve 100 % a směrem k pravé straně diagramu jeho koncentrace klesá až na 0. V tomto bodě se nachází prvek B rovněž se stoprocentním obsahem, jehož koncentrace klesá směrem k levému okraji diagramu (k prvku A). Na svislou osu je pak vynášena teplota.

Lépe se to dá objasnit na příkladu sestavení diagramu olovo – antimon. Chemicky čisté olovo se nechá roztavit v laboratorní pídce a tavenina se pak nechá chladnout. Při ochlazování taveniny je poté měřena závislost teploty na čase. Olovo tuhne při teplotě 327 °C a na této teplotě se pokles na určitý čas zastaví. Této části ochlazovací křivky se říká prodleva, kdy celá tavenina postupně tuhne do okamžiku, než ztuhne poslední zbytek taveniny. Stejně tak se dá zjistit teplota tuhnutí čistého antimonu, která je 630 °C. Pokud se provede pokus se slitinou s 90 % olova a 10 % antimonu, teplota počátku tuhnutí se pak podstatně sníží a současně byl změněn i charakter ochlazovací křivky. U slitiny s obsahem 50 % olova a 50 % antimonu má ochlazovací křivka podobnou charakteristiku. Krystaly antimonu se však začínají vylučovat při vyšší teplotě, ale na konci tuhnutí taveniny nastává prodleva při teplotě stejné. U slitiny s 86 % olova a 14 % antimonu tuhne tavenina při jedné teplotě. Tato teplota je shodná s teplotou prodlev obou předchozích slitin. Tato teplota se nazývá *eutektická* a bod C je *bodem eutektickým*. Bod tání této slitiny je podstatně nižší než u olova či antimonu. Z taveniny se při ochlazování vylučují krystaly toho kovu, kterého je více, než při eutektickém složení. Při dosažení teploty eutektického bodu se zbylá tavenina rozpadá na krystaly antimonu a olova. Tavenina se potom vyskytuje nad křivkou AC a CB, v poli BCE je tavenina a krystaly Pb a krystaly Sb jsou pod přímkou DCE. Takovýto typ diagramů platí pro slitiny dvou kovů navzájem rozpustných v tekutém stavu (v jakémkoliv poměru), ale zcela nerozpustných ve stavu tuhém.

Existují však další různé typy binárních diagramů. U slitin dvou kovů navzájem rozpustných v tekutém i tuhém stavu tvoří tyto slitiny tuhé roztoky. Některé typy diagramy mají tzv. peritektický bod (značí se P), což je vlastně obrácené eutektikum, při kterém vzniká nová fáze. V některých diagramech se vyskytuje eutektoidní bod, který se podobá eutektickému, protože leží na rozhraní tuhých fází.

1.2.1 Rovnovážný diagram železo-uhlík

Uhlík může být ve slitinách s železem rozpuštěn, nebo může s železem tvořit chemickou sloučeninu cementit (Fe_3C), anebo se může vyskytovat ve své elementární formě jako grafit. Pokud je uhlík ve formě grafitu, říkáme, že je ve formě stabilní. Cementit je naopak forma metastabilní. Z tohoto nerovnovážného stavu nepřechází do stavu rovnovážného ani za jakoukoliv dlouhou dobu a nemění se na grafit. Čisté slitiny s uhlíkem krystalizují vždy podle systému Fe- Fe_3C . Pouze pokud se slitina ochlazuje velmi pomalu, obsahuje-li křemík a je dlouhodobě žhána při vyšších teplotách, pak se rozpadá cementit Fe_3C na železo a uhlík.



Obr. 7 – Rovnovážný diagram železo-uhlík

Čisté železo se vyskytuje v modifikaci α a γ . Při teplotách do 911 °C se vyskytuje v modifikaci α a jeho mřížka je kubická prostorově centrovaná. Modifikace γ se vyskytuje v rozmezí teplot od 911 do 1392 °C. Při teplotách od 1392 až 1536 °C je železo ve stavu δ , má však stejnou mřížku jako železo α , pouze se liší velikost mřížkového parametru.

V metastabilní soustavě železa s uhlíkem tvoří hlavní strukturní součásti austenit, ferit a cementit.

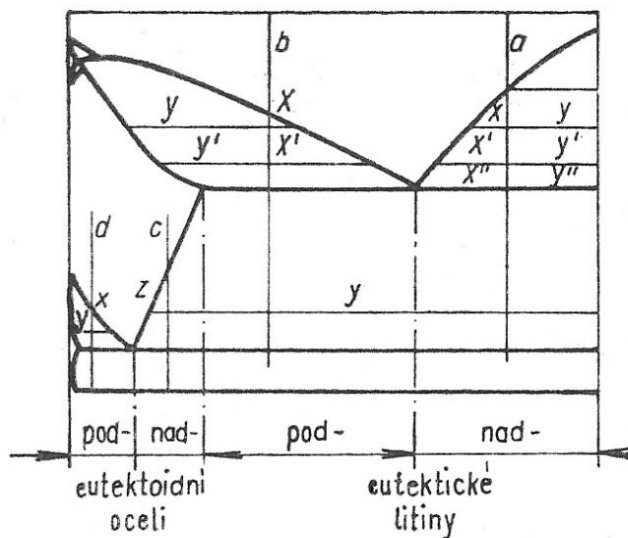
Austenit je tuhý roztok železa γ s uhlíkem, kde je uhlík umístěn ve středech hran a ve středu elementární buňky železa γ . Austenit je možno dobře tvarovat a nemá magnetické vlastnosti.

Ferit je intersticiální roztok uhlíku v železe α . Tato struktura je měkká a tvárná. Ferit je magnetický do teploty 760 °C, poté své magnetické vlastnosti ztrácí a tento ferit se potom nazývá ferit β .

Cementit má značku Fe_3C a má ortorombickou elementární buňku s dvanácti atomy železa a čtyřmi atomy uhlíku, obsahuje tedy 6,68 hmotnostních procent uhlíku.

V rovnovážném stavu železo-uhlík se potom vyskytují další struktury, které vznikají z těchto třech předešlých fází:

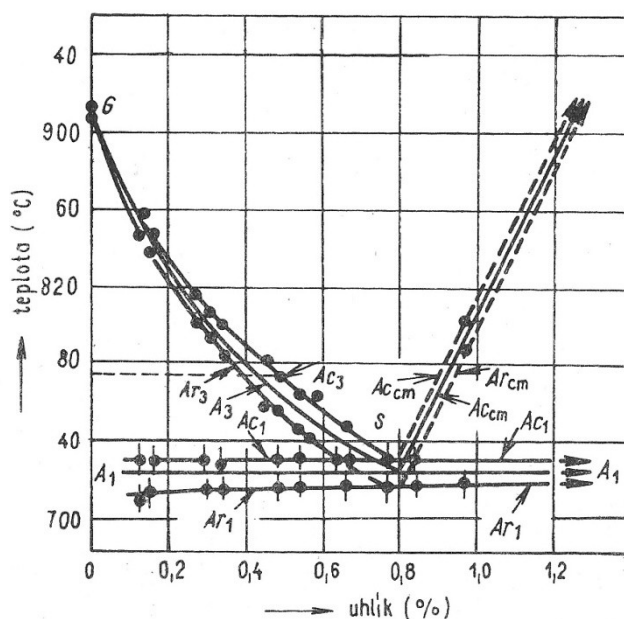
- *Ledeburit* – vytváří se z cementitu a austenitu
- *Perlit* – směs feritu a cementitu
- *Grafit* – čistý uhlík, vyskytuje se výjimečně jako vada zvaná černý lom a to při vysokém obsahu křemíku nebo uhlíku



Obr. 8 – Rozdělení ocelí v metalografii

1.3 Body přeměny

Při ohřevu a ochlazování oceli dochází ke změně objemu jak tepelnou dilatací, tak vlivem fázových přeměn. Tyto změny objemu jsou závislé na počtu atomů v elementární buňce mřížky jednotlivých modifikací železa (α a γ) a na velikosti těchto elementárních buněk. To je příčinou menšího měrného objemu (větší hustoty) u modifikace γ , neboť má těsnější uspořádání atomů. Těchto objemových změn při fázových přeměnách je potom využíváno k určování bodů přeměn jednotlivých ocelí při ohřevu a ochlazování dilatometrickou metodou.



Obr. 9 – Body přeměny čistých slitin železa a uhlíku

Body přeměny pro označení teploty počátku a konce objemových změn se značí A_1 a A_3 . Body přeměny při ohřevu se značí indexem c (Ac_1 , Ac_3) a body přeměny při ochlazování indexem r (Ar_1 , Ar_3). Při ohřevu jsou teploty bodů přeměny vyšší než při ochlazování, což je způsobeno tepelnou hystezí. Teplotní rozdíly se pak zvětšují s rychlostí ohřevu či ochlazování. Když je tato rychlost velmi malá, rozdíl mezi body Ac a Ar téměř mizí a tyto body pak splývají v jeden rovnovážný bod značený indexem e (Ae_1 , Ae_3). Někdy se ještě přidává ještě další index pro přesné rozlišení jak pro začátek, tak pro konec přeměny A_1 (Ac_{1p} , Ac_{1k} , Ar_{1p} , Ar_{1k}). Bod A_{cm} potom určuje při ohřevu (Ac_{cm}) teplotu konce rozpuštění a při ochlazování (Ar_{cm}) teplotu počátku vylučování cementitu z austenitu.

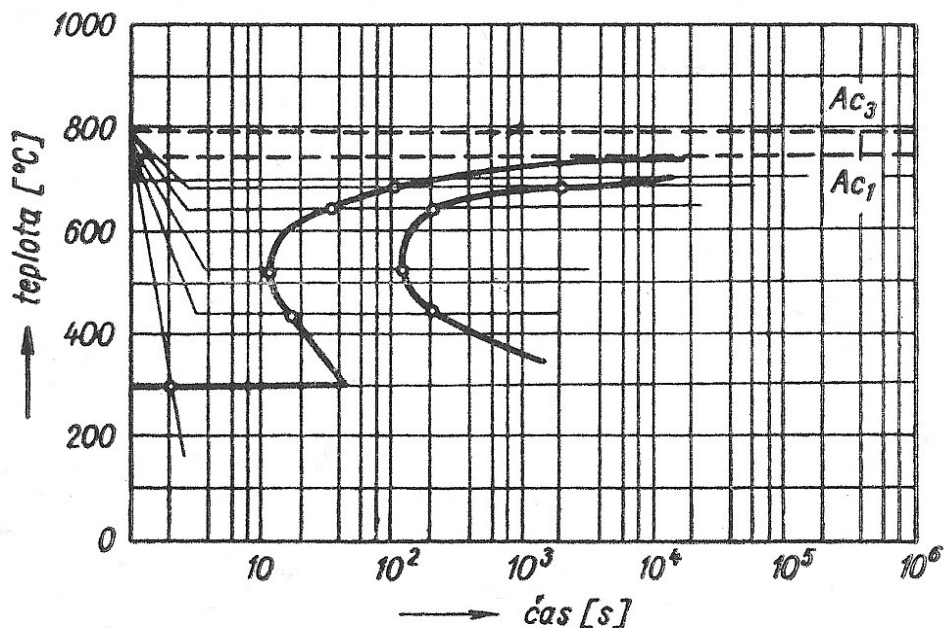
- A_0 (210 až 215 °C) – teplota, při níž cementit při ohřevu ztrácí a při ochlazování nabývá feromagnetické vlastnosti (Curieův bod cementitu).
- A_1 (727 °C) – teplota eutektoidní přeměny.
- A_2 (760 °C) – teplota změny feromagnetických vlastností železa α na paramagnetické (Curieův bod feritu). Nemění se však při něm struktura, proto nemá v metalografii význam.
- A_3 (727 až 911 °C) – teplota odpovídající přeměně železa α na železo γ .
- A_4 (1392 °C) – teplota přeměny železa γ na železo δ .

Přítomnost dalších prvků ve slitině může diagramu železo-uhlík velmi pozměnit. Kromě toho, že slitinové prvky posunují polohu obou bodů A_1 i A_3 , tak kromě kobaltu zmenšují rozpustnost uhlíku v austenitu. Některé slitinové prvky mohou s uhlíkem vytvářet sloučeniny (karbidy).

1.3.1 Diagramy IRA

Při tuhnutí a odlévání oceli mají význam fázové přeměny při změně stavu (tuhnutí taveniny), avšak při fázových přeměnách v tuhém stavu se mění struktura oceli, a tím tedy i její vlastnosti.

Jestliže jsou ochlazovací rychlosti vyšší, potom nastává vylučování cementitu a fázová přeměna při teplotách nižších než u rovnovážného diagramu. Odlišná je rovněž i struktura oceli. Tento ochlazovací proces lze asi nejlépe vysvětlit pomocí diagramu IRA (izotermického rozpadu austenitu).



Obr. 10 – Diagram IRA eutektoidní oceli

Vzorky oceli se zahřejí na teplotu nad bodem A_1 nebo A_3 (jsou tzv. austenitizované) a poté se co nejrychleji ochladí na různé teploty pod bodem A_1 . Při setrvání na těchto teplotách je pak možné dilatometricky nebo magnetometricky určit počátek a konec austenitu. Po spojení počátečních a koncových bodů rozpadu austenitu při různých teplotách vznikají obě hlavní křivky diagramu IRA.

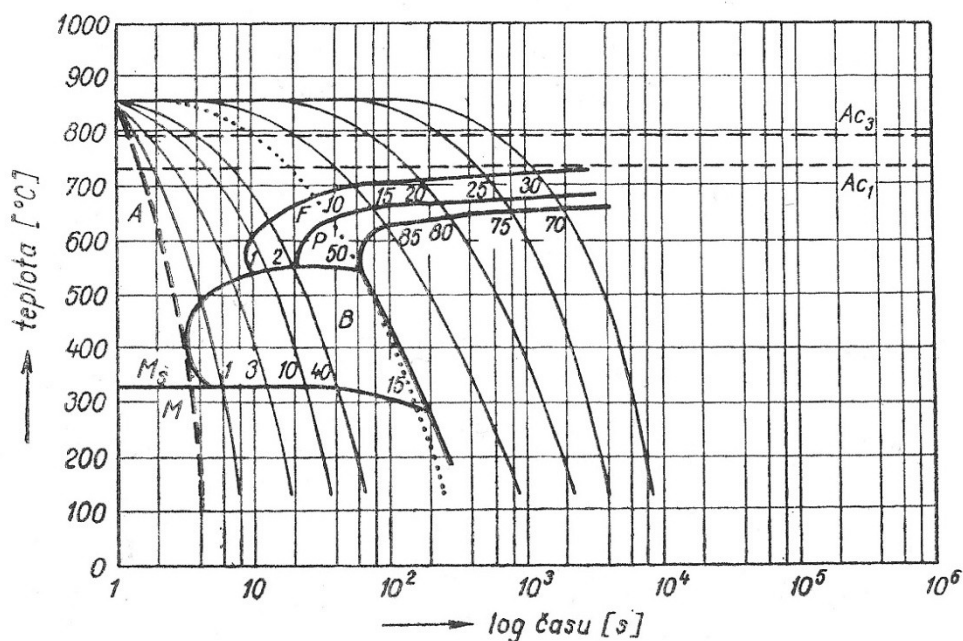
Při vyšších teplotách se austenit rozpadá na perlit, jehož struktura se zjemňuje se snižováním teploty. Při ještě nižších teplotách se austenit rozpadá na strukturu nazývanou *bainit*.

Tvar a poloha křivek diagramu IRA jsou dány chemickým složením austenitu, velikostí zrna a výškou austenitizační teploty. Vyšší austenitizační teplota způsobuje jak zhrubnutí zrna, tak i větší homogenizace austenitu. Oběma těmito vlivy je posunut počátek i konec rozpadu austenitu vpravo.

Jestliže je austenit podchlazen tak, že difúze uhlíku téměř zcela ustává, vzniká martenzit. Martenzitická přeměna při teplotě, která se označuje jako bod M_s , a končí při teplotě M_f , která je však mnohem nižší.

1.3.2 Diagramy ARA

U diagramů IRA je předpokládána nekonečně velká rychlost ochlazování. Vysokou ochlazovací rychlostí lze však ochlazovat pouze malé vzorky. V praxi mají při tepelném zpracování jednotlivé kusy oceli hmotnost až několik tun, proto je dosažení vysokých ochlazovacích rychlostí nemožné. Navíc většina postupů tepelného zpracování probíhá při plynulém ochlazování, proto se většinou využívá diagramů ARA (anizotermického rozpadu austenitu). V nich je pak pro různé ochlazovací rychlosti vyneseno počátek a konec přeměny, výsledná struktura a tvrdost.



Obr. 11 – Diagram ARA pro plynulé ochlazování oceli

Nejnižší rychlost, při níž ještě vzniká pouze martenzitická struktura, se nazývá *horní kritická ochlazovací rychlost*. *Dolní kritická ochlazovací rychlost* pak vyznačuje rychlost, při které se martenzit přestává tvořit. Číslice uvnitř diagramu určují procentuální podíl vzniklé struktury. Tvar diagramů ARA závisí na výšce austenitizační teploty, velikosti zrna a obsahu slitinových prvků. S rostoucí austenitizační teplotou a velikostí zrna se křivky posunují vpravo a dolů.

Všechny struktury, které vznikají při ochlazování přeměnou austenitu v perlit, bainit a martenzit nejsou v termodynamické rovnováze, a proto se všechny tyto struktury mění již při ohřevu na teploty pod bodem přeměny A_1 . Výjimkou jsou struktury, které se vytváří při velmi pomalém ochlazování nebo izotermickým rozpadem při vyšších teplotách politické přeměny.

1.4 Žihání oceli

Žihání oceli je proces tepelného zpracování, při kterém se ocel zahřeje na určitou teplotu, na této teplotě pak určitou dobu setrvá a následně se pomalu ochlazuje rychlostí blízkou ochlazování na vzduchu. Důvodem všech typů žihání je dosažení ať už více či méně rovnovážného stavu struktury látky. Nejčastěji se ocel žihá tak, aby se dosáhlo rovnovážné struktury bez vnitřních pnutí s dobrou tvárností a obrobiteľností.

Základní dělení žihání oceli:

- bez překrystalizace
- s překrystalizací

1.4.1 Žihání bez překrystalizace

U polymorfních struktur (měnící s teplotou krystalografickou mřížku struktury) platí, že se nesmí přesáhnout teplota A_{c1} . U nepolymorfních ocelí (např. vysokolegované oceli s austenitickou nebo feritickou strukturou) jsou všechna žihání, žihání bez překrystalizace.

Rekrystalizační žihání

Je to ohřev oceli tvářená za studena na teplotu v oblasti rekrystalizace, obvykle kolem 500 až 650 °C, výdrž na této teplotě po dobu asi 1 h a následující ochlazování. V tomto procesu nesmí teplota překročit mez teploty A_{c1} , pokud by se tak stalo, nastala by překrystalizace.

Účelem tohoto žihání je obnova tvárných vlastností po tváření za studena, neboli odstranění deformovaných zrn a odstranění zpevnění způsobeného tvářením za studena za současného vzniku nových feritických zrn bez znaků deformace a obnovení schopnosti plastické deformace oceli. U ocelí tvářených za studena lze dosáhnout zjemnění zrna, v některých případech i zhrubnutí zrna (transformátorové plechy). Tohoto žihání je především využíváno u ocelí s nízkým obsahem uhlíku, neboť právě ty se snadno plasticky deformují za studena.

Žihání ke snížení pnutí

V tomto případě žihání je účelem odstranit vnitřní pnutí bez záměrné změny struktury a bez podstatných změn původních vlastností oceli. Zařazuje se po takových operacích procesu výroby, při nichž k vnitřnímu pnutí dochází.

- a) po tuhnutí
- b) po tepelném zpracování
- c) po mechanickém zpracování
- d) po svařování apod.

Ocel se pomalu zahřeje na teplotu nižší než A_{c1} (obvykle na 450 až 650 °C), na této teplotě setrvá po dobu 1 až 2 hodin, a poté se pomalu ochlazuje až na teplotu od 150 do 350 °C tak, aby nevznikla nová pnutí. Tohoto typu žihání je možné využít pouze tehdy, nedojde-li k podstatnému ovlivnění původních vlastností oceli.

Protivločkové žihání

Protivločkové žihání je opatřením, aby se zabránilo vzniku vnitřních trhlinek (vloček), způsobené obsahem vodíku a vnitřním pnutím, k jehož vzniku došlo při tváření, ochlazování či fázové přeměně.

Původně se myslelo, že jsou vločky způsobeny pouze tlakem vodíku, a proto bylo zavedeno několik způsobů protivločkového žihání, které mělo odstranit vodík difúzí čili postupným uvolňováním vodíku z výkovků či vývalků pomalým ochlazováním (stápěním). Tyto výkovky či vývalky se nasazují přímo z tvářecí teploty do vychlazovací pece nebo tepelně izolované vychlazovací jámy kde pozvolna chladnou. Čím je polotovár větší, tím je větší i celkové množství obsaženého vodíku a také vzdálenost z vnitřku na povrch a o to delší doba je potřebná k difúzi vodíku. U hotového materiálu, který není dále tvářen, musí být ochlazování

velmi pomalé. Často se provádí i výdrž na teplotě A_{r1} a M_s a pomalé ochlazování se nesmí ukončit na teplotách vyšších než 150 °C. Při žihání velkých výkovků z ocelí náchylných k vločkovitosti může celková doba žihání činit i několik dní až týden.

Ke vzniku vloček v oceli však nedochází pouze působením tlaku vodíku, ale taky vnitřním pnutím, ke kterým dochází ve výše uvedených případech. Navíc během tuhnutí a ochlazování dochází ke změně koncentrace a rozložení vodíku v oceli. Při snižování teploty, klesá v oceli úměrně rozpustnost vodíku. Výrazný pokles rozpustnosti nastává při tuhnutí taveniny. Vodík je proto méně rozpustný v tuhé fázi, proto dochází k tomu, že při tuhnutí oceli je vodík vytlačován do míst které tuhnou jako poslední, tedy střed ingotu.

Protivločkové žihání není nutné provádět ihned po tváření, avšak teplota výkovku nesmí klesnout pod hodnotu M_s , která činí asi 200 °C. Následně se materiál ohřeje v peci na teplotu 600 °C, kde vydrží na této teplotě po dobu 2 až 10 hodin podle rozměrů kusu a pak se ochlazuje na teplotu pod 500 °C. Tímto postupem se umožní vodíku postupná difúze z oceli a následné pomalé ochlazení zabrání vzniku vnitřních pnutí.

1.4.2 Žihání s překrystalizací

Používá se u polymorfních ocelí ohřevem na kritické teploty, minimálně nad teplotu A_{c1} . Většinou však ohřev přesahuje teploty A_{c3} , resp. A_{cm} .

Základní žihání

Základní žihání se využívá ke zlepšení obrobiteľnosti a tvařitelnosti oceli, ke snížení tvrdosti a vnitřního pnutí. Ocel se ohřeje na teplotu 30 až 50 °C nad A_{c3} nebo A_{cm} a poté následuje výdrž na této teplotě a pomalé ochlazování v peci. V normách jakosti oceli se ocel po tomto tepelném zpracování označuje doplňkovou číslicí 2.

Homogenizační (difúzní) žihání

Je to ohřev na teplotu mnohem vyšší, než je poloha bodů A_{c3} a A_{cm} , a to při teplotách 1000 až 1250 °C, což jsou teploty 150 až 250 °C pod solidem. Výdrž na této teplotě je i více než 6 hodin, potom následuje pomalé ochlazení v peci. U žihání při takto vysokých teplotách zrno oceli hrubne, a proto se součást znovu zahřívá těsně nad teplotu A_3 , resp. A_{cm} a vyžihá se normalizačně. Ideální je rovněž spojení tohoto žihání s ohřevem k tváření. V tomto případě se jen prodlouží výdrž na válcovací nebo kovací teplotě o 2 až 4 hodiny.

Důvodem, proč se tohoto typu žihání využívá, je vyrovnat co nejvíce nestejnomyšernost chemického složení oceli difúzí. Tyto rozdíly v chemickém složení vznikají již při chladnutí oceli mezi teplotami likvidu a solidu.

Homogenizačního žihání se využívá pouze v případech, kdy je to opravdu nutné, neboť je poněkud nákladné a při delší výdrži na vysoké teplotě se na povrchu zpravidla vytvoří okuje a podpovrchové vrstvy se ochudí o uhlík (oduhličí).

Normalizační žíhání

Je považováno za základní druh žíhání s překrystalizací. Tento typ žíhání se používá na zjemnění hrubého zrna, to se v oceli může vytvářet již při lití, při tváření za vysoké teploty, nebo při dlouhodobém žíhání za vysokých teplot. Jednotlivé výrobky mohou mít tedy různé velké zrno, protože dokovací či doválcovací teplota, stupeň protváření a rychlost ochlazování po tváření se liší u všech výrobků a často i v různých částech jednoho výkovku, což může mít vliv na následující tepelné zpracování. Vytvořené zrno po normalizačním žíhání je jemnější, ale také stejnoměrně velké. Normalizačně žíhaný stav se v normách jakosti ocelí označuje doplňkovým číslem 1.

Podeutektoidní oceli se při normalizačním žíhání ohřívají na teplotu o 30 až 50 °C nad bodem přeměny Ac_3 a poté následuje volné ochlazení na vzduchu.

Nadeutektoidní oceli se většinou normalizačně nežíhají. Pokud se však má normalizačním žíháním těchto ocelí zjemnit zrno, probíhá ohřev jen nad teplotu Ac_1 a následuje ochlazení na vzduchu. Zrno při ohřevu nad teplotu Ac_{cm} zbytečně hrubne a při pomalém ochlazení se vyloučí karbidy rozpuštěné v austenitu na hranicích zrn a vytvoří se zde karbidická síť. Jestliže se má normalizačním žíháním odstranit tato karbidická síť na hranicích zrn, která se vytvořila při pomalém ochlazování po tváření, je ideální normalizační teplota asi 30 °C nad bodem Ac_{cm} a poté rychlé ochlazení až na teplotu pod 700 °C. Aby se austenit přeměnil na perlit a nenastalo zakalení, musí být následující ochlazování pomalé. Zakalení při tak vysoké austenitizační teplotě by způsobilo velká pnutí a vznik trhlin. Rychlým ochlazením mezi teplotami Ar_{cm} a Ar_1 se tedy potlačuje vznik nadeutektoidních karbidů na hranicích zrn.

Normalizační žíhání se používá buď jako konečná operace tepelného zpracování méně namáhaných strojních součástí (především z uhlíkových ocelí), nebo jako příprava pro následující kalení. Po normalizaci se ocelový výrobek ještě žíhá (žíhání na pevnost) při teplotách 500 až 600 °C. Tímto žíháním se odstraní vnitřní pnutí, sníží pevnost alepší plastické vlastnosti oceli.

Normalizační žíhání je velmi důležité u ocelových odlitků, protože při pomalém ochlazování z lící teploty vzniká hrubé a nestejnoměrné zrno. Normalizačním žíháním se nejenže zrno zjemní, alelepší se také plastické vlastnosti. Opakovaným žíháním dochází k většímu zjemnění.

Protože se vyžaduje rychlé ochlazení mezi teplotami Ar_{cm} a Ar_1 , jsou pro toto žíhání vhodné užívané ke kalení. Používají se také pece žíhací s výjezdovou nístějí.

Izotermické žíhání

Tento způsob žíhání je nejnovější. Izotermické žíhání je ohřev na teplotu obvykle o 30 až 50 °C vyšší než Ac_3 , resp. Ac_{cm} , výdrž na této teplotě, ochlazení na teplotu politické přeměny, výdrž na této teplotě až do ukončení přeměny austenitu v perlit a následující ochlazování.

Účelem tohoto žíhání je stejně jako u základního žíhání zlepšit obrobiteľnost a tváriteľnost oceli, snížit tvrdost a vnitřní pnutí. S rostoucí teplotou izotermické přeměny klesá výsledná tvrdost oceli. Tuto teplotu a dobu výdrže je možné vyčíst z diagramu IRA pro danou ocel a austenitizační teplotu.

Především u nadeutektoidních ocelí se izotermické žíhání dá použít k žíhání na měkko. V tomto případě se teplota austenitizace volí většinou nad bodem Ac_1 . Při správné teplotě izotermického rozpadu vzniká struktura tvořená velmi jemnými karbidy. Tyto karbidy mají stejnou velikost a jsou rovnoměrně rozložené, protože se vytváří za stejné teploty. Pokud by teplota v peci setrvala i po ukončení přeměny, karbidy by zhrubly.

Rychlé změny teploty u izotermického žíhání je možné dosáhnout jen u výrobků malých průměrů. K tomuto žíhání se používají válečkové pece, u kterých je mezi pásmem pro austenitizaci a pásmem pro izotermický rozpad umístěno pásmo pro ochlazování, to umožní rychlou změnu teploty.

U výrobků s velkým průměrem a při velkých pecních vsázkách jsou změny teploty pomalé. Izotermické žíhání u takovýchto předmětů se podobá žíhání s plynulým ochlazováním a výdrží na teplotě pod bodem A_{r1} .

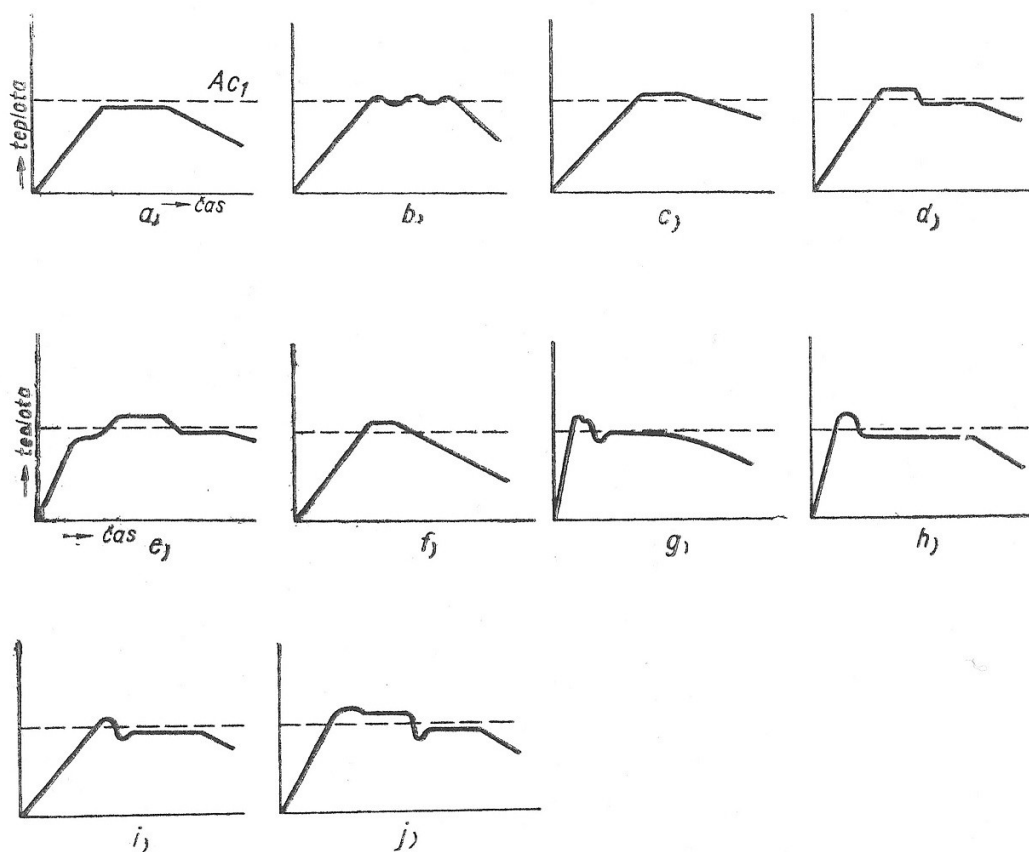
Žíhání na měkko

Tento druh žíhání slouží k snížení tvrdosti pro následující obrábění či tváření za studena, k získání vhodných mechanických, fyzikálních i jiných vlastností a k přípravě vhodné výchozí struktury pro následující kalení. V normách jakosti se označuje doplňkovou číslicí 3.

Existuje mnoho způsobů žíhání na měkko. Jedno z nejjednodušších je ohřev na teplotu těsně pod bodem A_{c1} a několikahodinová výdrž na této teplotě. Rychlost vylučování karbidů závisí na výchozí struktuře. Pokud je výchozí strukturou martenzit či bainit, karbidy se při této teplotě vylučují a shlukují docela rychle. Pokud je ovšem výchozí strukturou lamelární perlit, potom probíhá sbalování lamel poněkud pomaleji (s šířkou lamel klesá rychlost). Z hrubého lamelárního perlitu se při tomto způsobu žíhání vytvoří hrubý globulární perlit, tato struktura je však nevhodná pro následující kalení především u nadeutektoidních ocelí. Karbidické sít'ové (nadeutektoidní karbidy vyloučené na hranicích zrn) se však tímto způsobem žíhání neodstraní. Kolísáním žíhací teploty kolem bodu A_1 je možné urychlit průběh žíhání. Toho však neleže využít u velkých kusů či velkých vsázek, neboť změna teploty se projeví pouze na povrchu a ne v celém objemu.

Dalším způsobem žíhání na měkko je ohřev nad teplotou A_{c1} a následným pomalým plynulým ochlazováním. V tomto případě se globulární perlit vytváří podstatně rychleji. Tento způsob je jediný, kterým se dá docílit jemného globulárního perlitu, když je ve výchozí struktuře před žíháním hrubý lamelární perlit. Aby v ohřáté oceli bylo co nejvíce zárodků, ze kterých by se při ochlazování vylučovaly jemné a stejnosměrně rozložené karbidy, je zapotřebí austenitizace perlitu bez přílišné homogenizace austenitu. Čím pomalejší je ochlazování přes kritické teploty, tím hrubší jsou karbidy a nižší výsledná tvrdost. Je potřeba aby se ocel ochlazovala pomalu do teploty 600 až 650 °C, tedy pod teplotu maximální rozpustnosti uhlíku ve feritu.

Kvůli rozložení teploty se k žíhání na měkko používají malé pece, pokud se požaduje velký výkon, pak se používají pece průběžné – tunelové nebo válečkové. U velkých komorových pecí se provádí ohřev pomalý či stupňovitý.



Obr. 12 – Různé způsoby žíhání na měkko

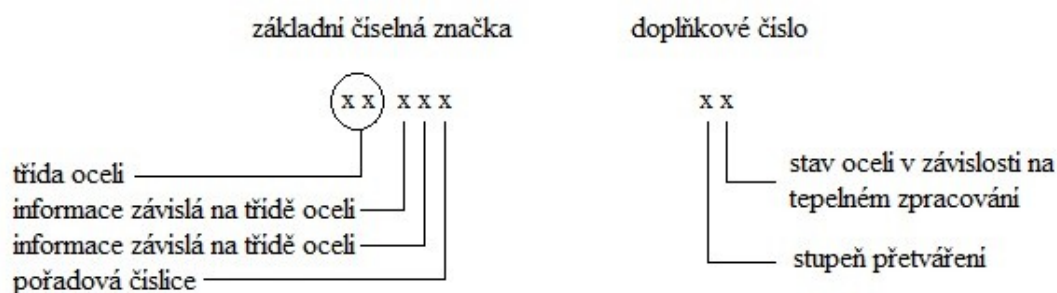
Žíhání s částečnou austenitizací

Je to ohřev oceli na teplotu mezi body Ac_1 a Ac_3 , výdrž k vyrovnaní teploty v celém objemu a ke vzniku heterogenní směsi feritu a austenitu a ochlazení oceli na klidném vzduchu nebo v peci. Účelem je částečné vyrovnaní chemického složení při využití různých rozpustností a rozdílných rychlostí difuze některých prvků v austenitu a ve feritu. Tímto typem žíhání se zvyšuje houževnatost oceli.

Tuto část práce jsem čerpal z literatury [3] a [4].

2 Konstrukční nelegované oceli

Oceli k tváření se označují pomocí základní číselné značky a doplňkového čísla oddělených od sebe tečkou. Základní číselná značka obsahuje pět číslic, přičemž první dvě označují třídu oceli. Konstrukční oceli jsou rozděleny do jednotlivých tříd podle chemického složení a s přihlédnutím podle účelu použití. Třetí a čtvrtá číslice je pak specifická pro každou třídu oceli. Pátá číslice je pořadovým číslem oceli. Doplňkové číslo obsahuje dvě číslice. První z nich má pak význam stupně přetváření a druhá stav oceli v závislosti na tepelném zpracování.



Obr. 13 – Číselné označování tvářených konstrukčních ocelí

Tab. 1 - Rozdělení tvářených konstrukčních ocelí do tříd

Třída oceli	Oceli podle stupně legování	Charakteristika ocelí
10	nelegované (uhlíkové)	oceli s předepsanými hodnotami mechanických vlastností, u nichž se chemické složení zpravidla nepředepisuje
11		oceli s předepsanými hodnotami mechanických vlastností a s předepsaným obsahem C, P, S, popřípadě P+S i dalších prvků
12		oceli s předepsaným obsahem C, Mn, Si, P, S, popřípadě P+S i dalších prvků
13	legované	nízkolegované oceli, legované zpravidla prvky: Mn, Si, Mn-Si, Mn-V
14		nízkolegované oceli, legované zpravidla prvky: Cr, Cr-Al, Cr-Mn, Cr-Si, Cr-Mn-Si
15		nízkolegované oceli, legované zpravidla prvky: Mo, Mn-Mo, Cr-Mo, Cr-V, Cr-W, Mn-Cr-V, Cr-Mo-V, Cr-Si-Mo-V, Cr-Mo-V-W
16		nízkolegované a středně legované oceli, legované zpravidla prvky: Ni, Cr-Ni, Ni-V, Cr-Ni-Mn, Cr-Ni-V, Cr-Ni-W, Cr-Ni-Mo, Ni-V-W, Cr-Ni-V-W
17		středně legované a vysokolegované oceli, legované prvky: Cr, Ni, Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-V, Cr-Al, Cr-Ni-Mo, Cr-Ni-Ti, Cr-Mo-V, Mn-Cr-Ni, Mn-Cr-Ti, Mn-Cr-V, Cr-Ni-Mo-V, Cr-Ni-Mo-W, Cr-Ni-Mo-Ti, Cr-Ni-V-W, Cr-Ni-W-Ti, Cr-Ni-Ti-Al, Ar-Mn-Ni-N, Mn-Cr-Mo-V, Cr-Ni-Mo-V-W, Cr-Ni-Mo-V-W-Ti

Konstrukční tvářené oceli se rozdělují do dvou skupin na nelegované (uhlíkové) a legované. Tyto dvě skupiny se následně dělí do tříd od 10 do 17 podle chemického složení.

Tab. 2 - Význam první číslice doplňkového čísla v číselném označení oceli

První číslice doplňkového čísla	Stav oceli, daný tepelným zpracováním
0	tepelně nezpracovaný
1	normalizačně žíhaný
2	žíhaný s uvedením způsobu žíhání
3	žíhaný na měkko
4	kalený nebo kalený a popuštěný při nízkých teplotách nebo po rozpouštěcím žíhání (jen u austenitických ocelí)
5	normalizačně žíhaný a popuštěný
6	zušlechtěný na dolní pevnost
7	zušlechtěný na střední pevnost, obvyklou u příslušné oceli
8	zušlechtěný na horní pevnost, obvyklou u příslušné oceli
9	stavy, které nelze označit první doplňkovou číslicí 0 až 8

Nelegované oceli

Nelegované tvářené oceli jsou uvedeny v normách ČSN 41 0xxx, 41 1xxx, 41 2xxx a nelegované oceli na odlitky potom v ČSN 42 26xx. Oceli každé třídy je poté možno rozdělit podle vlastností a použití na oceli obvyklých jakostí, na zušlechtování, na zvláštní a jednoúčelové použití.

2.1 Nelegované tvářené oceli obvyklých jakostí a na zušlechtování

U nelegovaných ocelí třídy 10 se většinou nezaručuje chemické složení, jen u některých bývá pouze omezen obsah fosforu a síry. Protože měď zhoršuje svařitelnost a tvářitelnost, zpravidla ji bývá max. 30 %. Taví se jako neuklidněné, polouklidněné a uklidněné. Oceli třídy 10 obvyklých jakostí se dodávají jako tyče, plechy, pásy, dráty, výkovky a trubky. Ve většině případů se tepelně nezpracovávají, ovšem tlusté plechy mohou být dodávány normalizačně žíhané. Tepelné zpracování je v posledních letech nahrazováno řízeným válcováním a konečná tvářecí teplota volena tak, aby měly oceli jemné zrno.

Tab. 3 *Nelegované oceli třídy 11*
Svařitelné oceli obvyklých jakostí

Značka	Chemické složení v %							Pozn.
	C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Ti	Al min.	
11 342	0,10	0,45	0,15	0,030	0,025	0,06 - 0,2	0,020	U
11 343	0,17			0,050	0,050			N, PU
11 373	0,22			0,050	0,050			N, PU
11 375	0,20			0,050	0,050			U, PU
11 378	0,16			0,045	0,045			U
11 402	0,10	0,55	0,15	0,030	0,025	0,06 - 0,2	0,020	U
11 423	0,24			0,050	0,050			N, PU
11 425	0,22			0,050	0,050			U
11 428	0,22			0,045	0,045			U
11 455	0,20			0,050	0,050			U

Tab. 4 *Svařitelné oceli se zvýšenou odolností proti atm. korozi pod*
ochrannými nátěry

Značka	Chemické složení v %						
	C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Cu	Pozn.
11 379	0,20			0,045	0,045	0,25 - 0,50	U, PU
11 529	0,20	1,50	0,55	0,045	0,045	0,25 - 0,50	U

Tab. 5 *Oceli se sníženým sklonem k stárnutí*

Značka	Chemické složení v %						
	C	Mn	Si	P	S	Al kov	Pozn.
	max.	max.	max.	max.	max.	min.	
11 381	0,16	0,70	0,35	0,030	0,030	0,020	U
11 431	0,20	0,80	0,35	0,035	0,030	0,020	U
11 481	0,20	1,30	0,45	0,035	0,030	0,020	U
11 531	0,20	1,50	0,55	0,035	0,030	0,020	U

Tab. 6 *Oceli s vyšší pevností*

Značka	Chemické složení v %					
		C max.	P max.	S max.		
11 500		0,38	0,050	0,050		
11 600		0,50	0,055	0,050		
11 700		0,65	0,055	0,050		
11 800		0,75	0,055	0,050		

Tab. 7 Oceli pro jednoúčelové použití

Značka	Chemické složení v %				Pozn.
		C max.	P max.	S max.	
11 558		0,45	0,050	0,050	1
11 354		0,15	0,050	0,050	2
11 901		1,10	0,060	0,060	3

1 ... uklidněná ocel na železniční vozidla

2 ... ocel na svařované řetězy

3 ... ocel na kované mlecí koule, odolná opotřebení

U ... uklidněná ocel, N ... neuklidněná ocel, PU ... polouklidněná ocel

Oceli obchodní jakosti 10 000 a 10 004 jsou vhodné na všeobecné použití. U těchto ocelí se zaručuje maximální pevnost a úhel ohybu pro zaručení zpracovatelnosti za studena. Ocel 10 004 má zaručeno max. 0,060 % P a S.

U ocelí jakosti 10 005, 10 370 a 10 420 není předepsáno chemické složení, je zde však zaručena minimální pevnost v tahu, mez kluzu a tažnost. Mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou však ovlivněny tloušťkou jejich stěny (rychlostí ochlazování z dovalčovacích teplot).

U ocelí třídy 10 při teplotách pod -30 °C příliš klesá jejich vrubová houževnatost, proto nejsou vhodné pro použití za těchto podmínek. Tyto oceli se také nepoužívají na cementování, zušlechťování ani na povrchové kalení. Je zde také zařazena jednoúčelová ocel ON 10 451. Z této oceli se vyrábějí nýty pro nýťované konstrukce z ocelí 11 523 a 11 483. Dále zde patří zvláštní skupina ocelí na výztuž betonářských konstrukcí.

Konstrukční oceli třídy 11 již mají zaručený maximální obsah uhlíku. Nedoporučuje se však používat na zušlechťování, cementování a povrchové kalení, neboť jsou dodávány jako neuklidněné a nemají omezenou spodní hranici uhlíku. Tyto oceli mají zpravidla větší nerovnoměrnost chemického složení, hlavně obsah síry a fosforu.

Do třídy 11 patří také skupina ocelí vhodných na svařované konstrukce a pracujících za normálních teplot. Obsah uhlíku bývá u těchto ocelí omezen na max. 0,20 % (v mimořádných případech na 0,25 %), neboť uhlík způsobuje horší svařitelnost. Oceli neuklidněné se používají na výrobu součástí ke svařování s tloušťkou stěny max. 16 mm, oceli uklidněné křemíkem potom do 25 mm a při větších tloušťkách stěny se používají oceli uklidněné hliníkem nebo mikrolegované niobem, vanadem či titanem. Na výrobu bezešvých trubek jsou používány oceli značky 11 353, 11 453, 11 550 a 11 650. Ocel 11 354 se používá na svařované řetězy. Do třídy 11 se zařazuje několik dalších skupin pro speciální použití – automatové oceli, hlubokotažné, pro nízké teploty, se sníženým sklonem k stárnutí.

Oceli třídy 12 jsou vhodné na zušlechťování, protože již mají vymezené hranice chemického složení. Označují se jako ušlechtilé nelegované oceli a v ušlechtilém stavu mají tedy maximální mechanické vlastnosti. Velmi namáhané součástky, jako jsou těžké hřídele apod., se také používají v normalizačně žíhaném stavu. U ocelí třídy 12 je obsah uhlíku v mezích od 0,22 do 0,70 %. Tyto oceli jsou také málo prokalitelné.

Bor, který prokalitelnost zvyšuje, se přidává do ocelí značek 12 042 a 12 052. Navíc ocel 12 042 má dobré plastické vlastnosti i při nízkých teplotách. Do konstrukční oceli značky 12 140 se přidává vanad, který zaručuje jemnozrnnou strukturu po normalizačním žíhání i u

součástí s větší tloušťkou stěny. Tato ocel je používána na těžké výkovky. U oceli 12 014 se zaručují magnetické vlastnosti.

Tab. 8 Tvářené nelegované oceli třídy 12

Značka	Chemické složení v %								Pozn.
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr max.	Ni max.	Cu max.	
12 014	max. 0,06	max. 0,45	max. 0,15	0,020	0,020				min 0,02 % Al kov
12 030	0,22 - 0,30	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30	
12 031	0,27 - 0,35	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30	
12 040	0,32 - 0,40	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30	
12 041	0,37 - 0,45	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,035	0,035	0,25	0,30	0,30	B 0,001 - 0,005
12 042	0,32 - 0,40	0,50 - 0,80	max. 0,35	0,040	0,040				
12 050	0,42 - 0,50	0,50 - 0,80	0,17 0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30	
12 051	0,47 - 0,55	0,50 - 0,80	0,17 0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30	
12 052	0,42 - 0,50	0,50 0,80	max. 0,35	0,040	0,040				B 0,001 - 0,005
12 060	0,52 - 0,60	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30	
12 061	0,57 - 0,65	0,50 - 0,80	0,17 0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30	
12 071	0,60 - 0,70	0,60 - 0,80	max. 0,35	0,035	0,035				
12 140	0,30 - 0,38	0,60 - 0,85	0,17 - 0,37	0,035	0,035	0,25	0,30	0,30	V 0,08 - 0,015

2.2 Automatové oceli

Z těchto ocelí se na automatech vyrábí šrouby, matice, kolíky apod. Při obrábění je požadováno, aby se vytvářela lámavá tříska, která plynule odpadáva. To je důležité pro minimální obsluhu stroje. Automatové oceli obvykle obsahují větší množství síry nebo fosforu. Do některých se pak přidává malé množství olova. Životnost obráběcích břitů se dá zvýšit také tím, že se do ocelí přidávají přísady, které na břitu vytvoří tenkou vrstvičku a ta potom brání přímému styku obráběné oceli s nástrojem. Pro další zabránění opotřebení břitu je třeba, aby tyto oceli měli nízký obsah tvrdých oxidických vměstků.

Obrobitelnost ocelí tedy závisí na množství sulfidů, ale také na jejich morfologii a velikosti (příznivě je ovlivněna sulfidy s průměrem větším než 10 μm , zejména jsou-li málo protažené ve směru tváření). Aby byl potlačen vznik eutektika Fe-FeS, jež má nízkou teplotu tání, musí být dostatečně vysoký poměr Mn : S.

Tab. 9 Automatové oceli zařazené v normě

Značka	Chemické složení v %					
	C	Mn	Si max.	P max.	S	jiné
11 109	max. 0,13	0,90 - 1,50		0,100	0,21 - 0,32	
11 110	0,07 - 0,16	0,60 - 1,10	0,40	0,100	0,15 - 0,25	
11 120	0,15 - 0,25	0,60 - 1,10	0,40	0,100	0,14 - 0,24	
11 121	max. 0,16	0,90 - 1,60	0,40	0,100	0,21 - 0,32	Ti 0,04 - 0,32
11 140	0,35 - 0,45	0,50 - 1,00	0,40	0,100	0,11 - 0,21	
12 012	max. 0,09	0,20 0,50	max. 0,15	0,035	0,040	min. 0,02 % Al dezox. SiCa
12 056	0,42 - 0,50	0,50 - 0,80	0,17 0,37	0,040	0,040	dezox. SiCa

Protože oxid křemičitý, který se vytváří při dezoxidaci, zhoršuje obrobitelnost, mají automatové oceli rovněž nízký obsah křemíku. Další prvkem, který způsobuje menší opotřebení břitu a větší lámavost třísky, je olovo. Olovo je však toxické a při vyšších obráběcích rychlostech se začíná vypařovat. Přísady jako selen, telur a bismut dokážou také snížit obrobitelnost, avšak jsou také toxické, a proto se v praxi zatím nepoužívají.

Automatové oceli je možno vyrábět jako uklidněné, polouklidněné a neuklidněné. Rovnoměrnější chemické složení a tím tedy i obrobitelnost mají oceli polouklidněné, a proto se v současnosti přechází na výrobu těchto ocelí.

2.3 Oceli na hluboký tah

Z těchto ocelí se vyrábějí tvářením zastudena, ale také zatepla, plechy vhodné pro další zpracování zastudena. Je u nich požadována co nejnížší mez kluzu, aby mohla plastická deformace probíhat již při nízkém napětí. Oceli nejvyšší jakosti pak mají mez kluzu max. 160 MPa a tažnost minimálně 45 %. Je třeba, aby měly oceli na hluboký tah plastické vlastnosti v celém tvářeném objemu, vyhovující tloušťkovou toleranci, minimální sklon ke stárnutí a nízkou cenu a požaduje se, aby se při lisování na povrchu nevytvářely deformační čáry.

V normě ČSN 42 0128 jsou uvedeny technické dodací podmínky a rozměry v normě ČSN 42 5302. U hlubokotažných plechů jsou jejich vlastnosti ovlivněny dovalcovací a svinovací teplotou a chemickým složením.

Tab. 10 Oceli na hluboký tah

Značka	Chemické složení v %						Způsob výroby
	C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S	Skupina	
11 300	0,09			0,040	0,040	HT	N
11 301	0,08	0,40		0,030	0,030	HT	N
11 304	0,07	0,40		0,025	0,025	VT	N
11 305	0,07	0,40		0,025	0,025	VT, min. 0,025 % Al	U
11 320	0,11			0,045	0,045	HT	N, PU
11 321	0,10	0,45		0,035	0,035	ST	N
11 325	0,10	0,45		0,035	0,035	ST, min. 0,020 % Al	U
11 330	0,13			0,050	0,050	MT	N
11 331	0,11	0,45		0,035	0,035	MT	N
11 402	0,10	0,55	0,15	0,030	0,030	VT, 0,06 - 0,20 % Ti	U
12 011	0,09	0,20 - 0,45	0,15	0,035	0,040	min. 0,020 % Al kov	1

Oproti rozboru chem. složení uvedeného v materiálových listech je při kontrolním rozboru povolena odchylka u neuklidněných ocelí 20 %, u polouklidněných 15 % a uklidněných 10 %
1 ... zvýšená odolnost proti stárnutí

Tab. 11 Rozdělení ocelí na hluboký tah podle ČSN 42 0127

Označení	Charakteristika
MT	vhodné na mírné tažení
ST	vhodné na střední tažení
HT	vhodné na hluboké tažení
VT	vhodné na velmi hluboké tažení

Obsah uhlíku se prakticky snižuje pod 0,10 %, neboť zvyšuje mez kluzu. Protože mangan zvyšuje pevnost feritu, jeho obsah se v ocelích na hluboký tah se pohybuje v rozmezí 0,20 až 0,60 %. Křemík zvyšuje mez kluzu a pružnost, proto má být jeho obsah v těchto ocelích co nejnížší (až pod 0,05 %). Fosfor, neboť zvyšuje pevnost a křehkost feritu, se omezuje na max. 0,030 až 0,035 %. Pevnost feritu zvyšuje také chrom, nikl, molybden a měď, proto je třeba, aby byl jejich obsah nižší než 0,12 až 0,15 %. Sulfidy způsobují horší tvárnost, proto je opět nutné jej omezit na co nejnížší hodnotu. Podle normy ČSN je optimální velikost zrna u

neuklidněných ocelí 5 a více a u uklidněných 6 až 7. Tyto oceli se odlévají jako uklidněné či neuklidněné.

2.4 Nelegované oceli na odlitky

Mechanické vlastnosti odlitků jsou závislé na chemickém složení, tepelném zpracování, lici teplotě a na rychlosti chladnutí ve formě (na tloušťce stěny). Tyto oceli se taví vždy jako uklidněné. Na konečnou dezoxidaci je obvykle používán hliník a požaduje se, aby byl jeho nadbytek tak velký, aby nedocházelo k reakci uhlíku s oxidem železnatým a tímto, aby se ve struktuře vyloučil 3. typ sulfidů. Na obsahu uhlíku závisí také velikost sekundárního austenitického zrna. U normalizačně žíhané oceli je velikost sekundárního austenitického zrna ovlivněna velikostí zrn perlitu a feritu.

Tab. 12 Nelegované oceli na odlitky

ČSN	Chemické složení v %					
	C	Mn	Si	P max.	S max.	P + S max.
	zásaditá pec kyselá pec					
42 2630	0,10 - 0,20	0,40 - 0,80	0,20 - 0,50	0,050	0,050	0,090
				0,060	0,060	0,110
42 2633	0,10 - 0,18	0,50 - 0,90	0,20 - 0,50	0,040	0,040	0,070
42 2640	0,20 - 0,28	0,40 - 0,80	0,20 - 0,50	0,050	0,050	0,090
42 2643	0,17 - 0,25	0,50 - 0,90	0,20 - 0,50	0,040	0,040	0,070
42 2650	0,28 - 0,38	0,40 - 0,80	0,20 - 0,50	0,050	0,050	0,090
				0,060	0,060	0,110
42 2660	0,40 - 0,50	0,40 - 0,80	0,20 - 0,50	0,050	0,050	0,090
				0,060	0,060	0,110
42 2670	0,50 - 0,60	0,40 - 0,80	0,20 - 0,50	0,050	0,050	0,090
				0,060	0,060	0,110

U nelegovaných ocelí na odlitky se obvykle neprovádí homogenizační žíhání a teplota normalizačního žíhání je relativně nízká, proto se počítá s větší chemickou nehomogenitou.

Plastické vlastnosti těchto ocelí jsou nižší než u ocelí tvářených (zejména při vyšších pevnostech). Tyto vlastnosti jsou také sníženy slévarenskými vadami jako řediny apod. U komplikovaných odlitků se odstraňují těžce a musí se s nimi počítat hlavně při odlitcích, které pracují při záporných teplotách. Plastické vlastnosti snižuje síra a fosfor.

Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny obsahem uhlíku v oceli. S rostoucím obsahem uhlíku se plynule zvyšuje pevnost a mez kluzu, ale naopak se snižují plastické vlastnosti oceli.

Odlitky z nelegovaných ocelí se vždy žíhají normalizačně. Teploty normalizačního žíhání se pohybují v rozmezí 900 až 920 °C a jsou tedy vyšší než u tvářených ocelí. Tyto vyšší teploty příznivě ovlivňují vrubovou houževnatost. Po normalizačním žíhání následuje žíhání ke snížení pnutí mezi teplotami 600 až 630 °C. Následně probíhá ochlazování na klidném vzduchu. Rychlejší ochlazování zvyšuje mez kluzu a vrubovou houževnatost, ale snižuje napětí v odlitku.

Podrobný popis konstrukčních ocelí naleznete v literatuře [2].

3 Magnetické vlastnosti látek

Následující část je převzatá z literatury [1], [5], [6] a [7].

Magnetické vlastnosti látek a materiálů se posuzují podle toho, jak se daná látka nebo materiál chová v magnetickém poli, ve kterém je umístěna. Podle toho jak tyto materiály či látky na toto pole reagují, se dají rozdělit do tří skupin:

- diamagnetické
- paramagnetické
- feromagnetické

O diamagnetických a paramagnetických látkách lze říci, že jsou slabě magnetické a feromagnetické látky jsou pak látkami silně magnetickými.

Magnetické pole, ve kterém se daná látka nachází, je možné v určitém bodě prostoru popsat dvěma určujícími vektory:

intenzitou magnetického pole \vec{H} [A/m]

magnetickou indukci \vec{B} [T]

Závislost mezi těmito veličinami je pak možné popsat pomocí vztahu:

$$\vec{B} = f(\vec{H}) = \mu \cdot \vec{H} = \mu_r \mu_0 \cdot \vec{H} \quad [\text{T}] \quad (1)$$

μ_0 – permeabilita vakua ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$)

μ_r – relativní permeabilita

μ – absolutní permeabilita prostředí

Z uvedeného vztahu je zřejmé, že za jednotkové prostředí při posuzování magnetických vlastností látek a materiálů je zde považováno vakuum. Pro přesnější posuzování magnetických vlastností některých materiálů a látek je dále vhodné rozdělit výslednou složku magnetické indukce v daném vzorku na složku indukce způsobenou samotnou látkou a složku indukce připadající na magneticky všudy přítomný nadprostor vakua.

Tyto složky můžeme označit takto:

\vec{B}_0 - magnetická indukce vakua [T]

\vec{B}_m – magnetická indukce vlastní látky nebo materiálu [T]

Výsledná složka magnetické indukce je pak dána vztahem:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m \quad [\text{T}] \quad (2)$$

Následná velikost relativní permeability je poté:

$$\mu_r = \frac{\vec{B}}{\vec{B}_0} = 1 + \frac{\vec{B}_m}{\vec{B}_0} \quad (3)$$

Pro podrobnější popis se dále zavádí:

Vektor magnetizace – složka intenzity magnetického pole ve vzorku způsobená jeho vlastními magnetickými vlastnostmi

$$\overline{M} = \frac{\overline{B}}{\mu_0} - \overline{H} \text{ [A/m]} \quad (4)$$

Vektor polarizace – složka magnetické indukce vyvolaná ve vzorku jeho vlastními magnetickými vlastnostmi

$$\overline{J} = \overline{B} - \mu_0 \overline{H} \text{ [T]} \quad (5)$$

Magnetická susceptibilita

$$\kappa = \mu_r - 1 = \frac{\overline{B}_m}{\overline{B}_0} \quad (6)$$

dále platí:

$$\overline{J} = \overline{B} - \mu_0 \overline{H} = (\mu_r - 1) \mu_0 \overline{H} = \kappa \mu_0 \overline{H} \quad (7)$$

$$\overline{B} = \mu_0 \overline{H} + \overline{J} = \mu_0 \overline{H} + \kappa \mu_0 \overline{H} \quad (8)$$

Základní parametry, které určují magnetické vlastnosti látek a materiálů tedy jsou:

μ - magnetická susceptibilita

κ – magnetická susceptibilita

Podle velikosti hodnot těchto veličin se dané materiály a látky rozdělují do výše uvedených skupin na látky diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické:

- 1) diamagnetické látky - permeabilita $\mu < 1$ a susceptibilita $\kappa < 0$ a zároveň jsou μ i κ nezávislé na intenzitě magnetického pole H
- 2) paramagnetické látky - $\mu > 1$ a $\kappa > 0$ a zároveň jsou μ i κ nezávislé na H , v obou případech se μ jen nepatrně liší od 1
- 3) feromagnetické látky - $\mu \gg 1$ a $\kappa > 0$; $\mu = f(H)$, $\kappa = f(H)$

3.1 Diamagnetické látky

Elektrony těchto látek, které obíhají kolem atomového jádra, získávají po vložení do vnějšího magnetického pole jakýsi přírůstek úhlové rychlosti, čímž vzniká malý magnetický moment, který je však orientovaný proti vnějšímu magnetickému poli a představuje tak vlastní diamagnetismus. V nulovém vnějším magnetickém poli mají tyto látky nulový magnetický moment. To znamená, že intenzita magnetizace těchto látek je opačného směru než vnější magnetické pole, takže vektor magnetické indukce má také opačný směr oproti vnějšímu poli.

Susceptibilita neboli poměr přírůstku magnetické indukce, vyvolaného polarizací, k indukci, která by byla při stejné intenzitě pole v prázdnu, je u diamagnetických látek vždy záporná. Ve většině případů susceptibilita nezávisí na teplotě ani na intenzitě pole. U některých látek susceptibilita dosahuje vysokých hodnot a je teplotně závislá, těmto látkám říkáme anomální diamagnetika. Zvláštním případem jsou supravodiče (superdiamagnetika), u nichž je susceptibilita v supravodivém stavu extrémně velká ($\kappa = -1$).

Klasická diamagnetika – susceptibilita nezávisí na teplotě ani intenzitě pole

- inertní plyny, voda
- prvky Cu, Au, Ag, Si, P, S, Zn, Hg
- většina organických látek

Anomální diamagnetika – susceptibilita závisí na teplotě a dosahuje vysokých hodnot

- Sb, Bi, C (grafit)
- některé slitiny

Superdiamagnetika – v supravodivém stavu mají extrémně vysokou susceptibilitu ($\kappa = -1$)

3.2 Paramagnetické látky

Na rozdíl od diamagnetických látek mají atomy nebo molekuly těchto látek určitý magnetický moment. Magnetické momenty jednotlivých atomů či molekul rozloženy ve všech směrech, a nepůsobí-li na tuto látku vnější magnetické pole, je výsledný moment nulový. Pokud začneme na paramagnetickou látku působit magnetickým polem, magnetické momenty částic se pomalu začnou natáčet ve směru pole a látka tak začne jevit určitou magnetizaci. Tato magnetizace má stejný směr jako vnější magnetické pole, takže na rozdíl od diamagnetických látek je magnetická indukce větší než indukce v prázdnu. Susceptibilita paramagnetických látek je tedy kladná.

U slabých paramagnetik se susceptibilita mění jen velmi málo, kdežto u silných paramagnetik závisí na Curieově vztahu $\kappa = \frac{C}{T}$, kde C je takzvaná Curieova konstanta specifická pro určité paramagnetikum. Z Curieova vztahu můžeme upozorovat, že susceptibilita je nepřímo úměrná teplotě. U feromagnetických látek dochází při zahřátí nad Curieovu teplotu k přechodu látky do paramagnetického stavu.

Klasická paramagnetika – susceptibilita je nepřímo úměrná absolutní teplotě a v běžných případech nezávisí na velikosti pole

- slabá – O₂, NO, vzduch
- silná – přechodové prvky (Cr, Mn, Pd, Pt, ...)
- feromagnetické materiály nad Curieovou teplotou T_c

Anomální paramagnetika – susceptibilita není závislá na teplotě a má mimořádně nízkou teplotu

- alkalické kovy (Li, Na, K, Rb)

Metamagnetika (supermagnetika) – jeví hysterezi podobně jako feromagnetika

- některé chloridy (FeCl_2 , CoCl_2 , ...)

Antiferomagnetika – podobná feromagnetickým látkám, na venek se však chovají jako paramagnetika a při překročení Curieovy teploty T_C přecházejí do pravého paramagnetického stavu

- některé sloučeniny feromagnetických prvků (MnO , Cr_2O_3 , FeS , ...)

3.3 Feromagnetické materiály

Feromagnetické materiály se liší od slabě magnetických látek (diamagnetik a paramagnetik) tím, že je v nich možno i slabým polem vyvolat silnou magnetizaci, která zcela nevymizí ani po odstranění vnějšího pole. Patří zde převážná většina technicky využitelných magnetických materiálů.

Teorii feromagnetizmu zveřejnil P. Weiss a je založena na dvou předpokladech. První se týká existence vnitřního pole (molekulárního), které za teplot nižších než je Curieova, vyvolává v oddělených oblastech feromagnetika nasycenou magnetizaci (samovolnou či spontánní). Druhý předpokladem je, že se každé feromagnetikum rozpadá pod Curieovou teplotou na malé oblasti zvané domény, z nichž každá je magnetována spontánně do nasycení.

Molekulární pole působí nasycenou magnetizaci ve feromagnetických oblastech tím, že v každé z nich staví výsledné magnetické momenty atomů či iontů souhlasně, paralelně. Pokud vnější pole nepůsobí, pak v každé oblasti jsou směry spontánní magnetizace různé, její účinky se navzájem ruší a látka se jeví navenek jako nemagnetická. Pokud však budeme na tuto látku působit vnějším polem, dojde k postupnému uspořádání spontánní magnetizace v oblastech do toho směru tak, že látka jako celek získá určitou pozorovatelnou magnetizaci. Nasycené magnetizace potom látka dosáhne tehdy, jestliže ve všech doménách (v celém objemu feromagnetika) bude směr spontánní magnetizace souhlasný. Weiss předpokládal, že molekulární pole H_m působící na určitý dipól je možné zapsat takto:

$$H_m = H + \gamma M \quad (9)$$

H – vnější pole

M – magnetizace

γ – konstanta molekulárního pole (Weissova konstanta)

Podle druhého Weissova předpokladu se každé feromagnetikum rozpadá na malé oblasti spontánně magnetované do nasycení. Z tohoto předpokladu se vychází při studiu magnetizační křivky.

Magnetizační křivka v užším smyslu slova vyjadřuje vztah mezi vnějším magnetickým polem a magnetizací dané látky. Touto magnetizací máme na mysli magnetizaci tělesa jako celku, jejíž hodnota je vždy menší nebo rovná hodnotě spontánní magnetizace. Pokud je teplota tělesa nižší než Curieova, je hodnota spontánní magnetizace vždy různá od nuly.

Změny magnetizace s vnějším magnetickým polem mohou být u feromagnetik velmi značné, avšak velikost spontánní magnetizace zůstává vnějším polem téměř nedotčena, pokud ovšem nejde o teploty blízké Curieově teplotě.

Magnetizační křivka je jedním z nejdůležitějších graficky vyjádřených vztahů v nauce o magnetismu. Vyjadřuje závislost $I = f(H)$ a souvisí s doménovou strukturou, kterou Weiss přisoudil feromagnetickým látkám.

Feromagnetické materiály se dále dělí na:

- Magneticky měkké materiály
- Magneticky tvrdé materiály

3.3.1 Magneticky měkké materiály

Magneticky měkké materiály (měkké železo) bývají velice často měkké i mechanicky a magneticky tvrdé materiály bývají naopak i mechanicky tvrdé. Tyto materiály mívají strmou křivku prvotní magnetizace a úzkou hysterezní smyčku o malé ploše (malá koercitivní síla a velká počáteční i maximální permeabilita).

Magneticky měkké materiály jsou používány na výrobu transformátorů, relé, měřících přístrojů, pro jádra elektricky točivých strojů apod. Požaduje se od nich:

- a) velká permeabilita
- b) malá koercitivní síla
- c) nízké wattové ztráty
- d) pokud možno vysoká indukce
- e) odolnost proti stárnutí

Magneticky měkkým kovem, který má nejideálnější magnetické vlastnosti, je čisté elektrolytické železo. Na magnetické vlastnosti železa mají příměsi (nejčastěji uhlík, síra, fosfor, křemík, kyslík, dusík, vodík a různé kovy) téměř ve všech případech nepříznivý vliv. Elektrolytickou výrobou i jeho zpracováním tavením, litím a žiháním se dosáhlo téměř čistého železa. Čisté elektrolytické železo, které je zbavené vodíku přetavením nebo žiháním ve vakuu, dosahuje těchto hodnot: $\mu_{\text{poč}} = 500$; $\mu_{\text{max}} = 15\,000$; $H_c = 7,95$ až 32 A/m .

Železo armco o čistotě 99,85 % Fe má také dobré magnetické vlastnosti. Tyto železa o vysoké čistotě však mají malý specifický odpor (velkou elektrickou vodivost). Malý specifický odpor způsobuje velké ztráty vířivými proudy, proto se ve střídavých polích nepoužívají. Avšak používají se ve stejnosměrných polích tam, kde se vyžaduje vysoká hodnota nasycení.

Protože křemík zvyšuje specifický elektrický odpor, používají se slitiny železa s křemíkem při výrobě točivých strojů a transformátorů, u nichž dochází k cyklickým magnetizačním pochodům. Oceli legované křemíkem jsou prakticky nejlevnějším magnetickým materiálem. Kromě zvyšování specifického elektrického odporu zmenšuje křemík koercitivní sílu a hysterezní ztráty. Dále křemík poněkud snižuje hodnotu magnetického sycení, ale zvětšuje odolnost proti stárnutí a tím i odolnost magnetických vlastností proti otřesům.

Magnetické vlastnosti se dají zlepšit, pokud se do slitiny přidá hliník. Slitina, obsahující kromě železa ještě 10 % Si a 5 % Al, se nazývá *sendust (alsifer)*. Tato slitina má mimořádně vysokou hodnotu permeability (až 160 000) s nízkou koercitivní silou ($1,99\text{ A/m}$) a dá se téměř považovat za izotropní materiál.

Slitina s obsahem 2 % Si a 6 % Co se nazývá *hyperm*. Vyrábějí se z něj například plechy pro jeřábové či tramvajové motory. Tyto plechy dosahují magnetického sycení až 2,2 T.

Vynikající magnetické vlastnosti pak dosahují slitiny s niklem a nazývají se *permalloye*. Vedle absolutně čistého železa jsou považovány za nejměkčí materiály. Tyto slitiny mají velmi vysokou permeabilitu (maximální permeabilita je 80 000 až 100 000 i více), malou koerktivní sílu (pod 2,4 A/m) a nízké hysterezní ztráty.

Slitiny s přísadou kobaltu mají konstantní počáteční permeabilitu ve slabých magnetických polích. K těmto slitinám patří například *perminvar* s obsahem 45 % Fe, 30 % Fe a 25 % Co. Tento materiál má značný měrný elektrický odpor a po správném žitání (450 °C po několik dní) se dosáhne hodnoty $\mu_{poč} = 450$. U magnetických polí do intenzity až 159 A/m zůstává počáteční permeabilita konstantní s odchylkou ± 1 %.

Tab. 13 - Třídění magneticky měkkých materiálů dle normy IEC

Tab. 15 - Průběh magnetických měření materiálů dle normy IEC					
A	Železo				
B	Nízkouhlíkaté oceli				
C	Křemíkové oceli	C1	masivní materiály		
		C2	ploché materiály	C21	izotropní
				C22	anizotropní
				C23	tenké
D	Ostatní oceli				
E	Slitiny Ni-Fe	E1	72 - 83 Ni		
		E2	54 - 68 Ni		
		E3	45 - 50 Ni		
		E4	35 - 40 Ni		
		E5	cca 30 Ni		
F	Slitiny Fe-Co	F1	47 - 50 Co		
		F2	35 Co		
		F3	23 - 27 Co		
G	Ostatní slitiny	G1	Al - Fe		
		G2	Al - Si - Fe		
H	Magneticky měkká keramika				

Tab. 14 - Nízkouhlíkaté oceli (B dle IEC) a permendur

Název	Výrobce	B _s (T)	T _c (°C)	H _c (A/M)	μ ₄	μ _{max}
čisté železo (B):						
Hyperion	Krupp	2,15	770	60 - 120	300	8000
Hyperion A				160 - 240	250	7000
Arema						
Armco	Železářny Chomutov					
Vacofer	VAC	2,15			150 - 200	
Permendur (F1):						
Permendur	Telcon					
Hyperion Co50	Krupp	2,35	950	80	1000	11000
Vacoflux 50	VAC	2,35		110	1000	

3.3.2 Magneticky tvrdé materiály

Tyto materiály se v technické praxi používají na výrobu trvalých magnetů. Od magneticky tvrdých materiálů se vyžaduje vysoká hodnota koercitivní síly, remanence i jakostního součinu $(BH)_{\max}$. Tyhle požadavky splňují oceli s velkým vnitřním pnutím, a proto se na výrobu permanentních magnetů používají kalené oceli s martenzitickou strukturou. Tato struktura je však nestabilní, což je příčinou stárnutí (tedy ztráty dobrých magnetických vlastností).

Na výrobu levných běžných magnetů se používala zakalená uhlíkatá ocel, u které se zvyšujícím se obsahem uhlíku stoupá koercitivní síla. Avšak s následným zvyšováním uhlíku nad určitou mez začíná klesat remanence. Optimální obsah uhlíku je tedy asi 0,9 %. Tato ocel nemá zvláště dobré magnetické vlastnosti (remanence 0,9 až 1,2 T a koercitivní síla 1590 až 3970 A/m) a navíc je nestabilní s časem. Mechanická namáhání u těchto ocelí způsobují změny magnetických vlastností. Z těchto důvodů dochází k úpadku používání permanentních magnetů z uhlíkatých ocelí.

Zavedením wolframových ocelí s obsahem 0,5 až 1,1 % C a 1,5 až 7 % W se dosáhlo zlepšením magnetických vlastností. Wolfram v uhlíkaté oceli zvětšuje remanenci i koercitivní sílu. U těchto ocelí se však také časem zhoršují magnetické vlastnosti a klesá odolnost vůči teplotám nad 100 °C. Příměs wolframu navíc tyto oceli prodražuje, a proto se používají méně často.

U kobaltových ocelí došlo k podstatnému zlepšení magnetických vlastností. Tyto oceli obsahují 2 až 45 %, 1 % C a další přísady (2 až 10 % Cr, 0 až 7 % W, 0 až 2 % Mo atd.), a mají poté remanenci 0,75 až 1,1 T, koercitivní sílu 5570 až 22 290 A/m a jakostní součin $(BH)_{\max}$ 2300 až 4380 Jm⁻³.

Nezvykle výhodné magnetické vlastnosti potom mají magnety vyrobené z ternárních vytvrzovatelných slitin železa, niklu a hliníku, které se nazývají *alni*. Tyto slitiny mají nízký obsah uhlíku a nejsou kujné. Později se do těchto slitin přidal ve větším množství kobalt a vznikly slitiny *alnico*. Slitiny alnico jsou odolné proti otřesům, vlivu teplot a střídavého elektrického pole.

Dále se používají slitiny mědi, niklu a železa popř. kobaltu, které jsou po tepelném zpracování, kalení a vytvrzování dobře tvárné válcováním, tažením, kováním, lisováním a různým obráběním. Tyto slitiny se označují jako *cunife* (Cu, Ni, Fe) a *cunico* (Cu, Ni, Co).

Slitiny cunife obsahují 60 % Cu, 20 % Ni a 20 % Fe a mají remanenci 0,5 až 0,58 T, koercitivní sílu 35 000 až 47 760 A/m a $(BH)_{\max}$ mezi 4370 až 7560 Jm⁻³. Slitiny cunico se skládají z 35 až 60 % Cu a 20 až 41 % Co. Jejich koercitivní síla je zhruba 55 700 A/m a jakostní součin $(BH)_{\max}$ 3980 Jm⁻³.

Další skupinou materiálů pro trvalé magnety tvoří kovové práškové magnety, které umožňují dosáhnout velké rozměrové přesnosti a téměř zcela odstraňují pracné obrábění. Patří zde například spékané (sintrované) kovové magnety (typu AlNi, AlNiCo). Výchozími materiály jsou Fe, Ni a Co a hliník se pak přidává v podobě práškové předslitiny s železem, niklem či mědi. Tyto práškové kovy musí být velice čisté, s malým obsahem uhlíku. Po promíšení, rozemletí a prosévání se směsi lisují a vypékají při vysokých teplotách 1250 až 1330 °C. Technologie spékání se využívá pro výrobu magnetů malých rozměrů.

3.4 Metody měření magnetických vlastností ocelí

Oceli patří mezi materiály feromagnetické. Magnetické vlastnosti feromagnetických materiálů se zjišťují měřením změn indukce v materiálu, které jsou způsobeny změnami intenzity vnějšího magnetického pole. Cílem měření je tedy určit skutečné magnetické vlastnosti určitého objemového vzorku materiálu, které vykazuje jeho vnitřní objem. Z tohoto pohledu by bylo ideální měřit parametry magnetického pole v určitém místě vnitřního objemu materiálu, což je ovšem do určité míry možné pouze u plyných a kapalných látek (klasické metody měření magnetických polí ve vzduchu pomocí senzorů).



Obr. 14 – Metody měření silně magnetických látek

Tento způsob však nelze využít u pevných látek a materiálů, proto se posuzují a vyhodnocují magnetické vlastnosti těchto materiálů z parametrů magnetického pole v jejich okolí. Tyto magnetické vlastnosti se vždy vztahují na určitý objem měřeného vzorku, který je dán velikostí a geometrií. Pro kvalitní měření magnetických vlastností materiálu, ze kterého je vzorek zhotoven, je důležité zajistit rovnoměrné rozložení magnetického pole (homogenitu pole). Důležitými parametry pro správné určení měřených veličin jsou tedy vnější rozměry vzorku a jeho geometrické uspořádání.

Uzavřené vzorky

Takovýto vzorek tvoří uzavřený magnetický obvod. V tomto vzorku je možné dosáhnout homogenního pole a vyloučit tak rozptylové toky, pokud je obvod homogenní a vinutí je rovnoměrně rozloženo. Uzavřené vzorky jsou také málo citlivé na vliv vnějších magnetických polí. Vzorky s malým průřezem a vysokou permeabilitou však mohou být ovlivněny i zemským magnetickým polem.

Uzavřené vzorky je možné rozdělit do tří skupin:

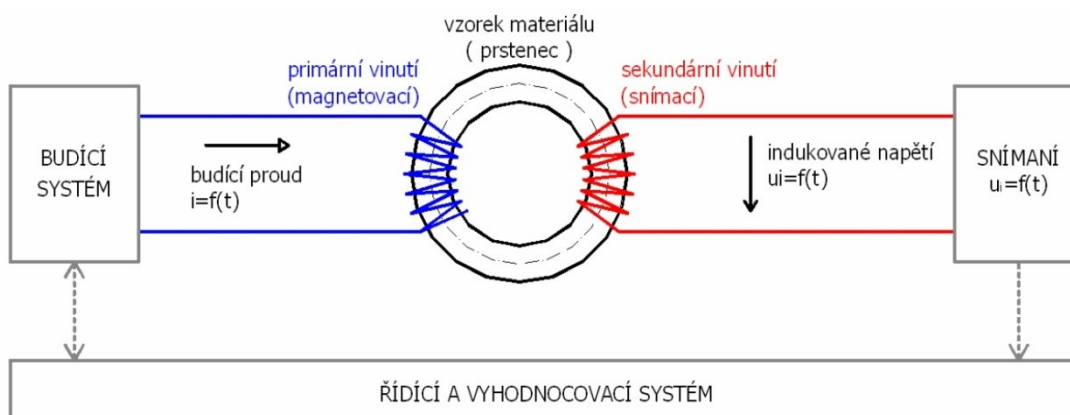
- prstencové vzorky s kruhovým průřezem
- prstencové vzorky s obdélníkovým průřezem
- rámcové vzorky s obdélníkovým průřezem

Prstencové typy vzorků se nazývají toroidy. Jelikož je praktická část této práce zaměřena na zjišťování experimentálních vlastností toroidních vzorků oceli a protože jsou tyto vzorky z hlediska určení střední délky siločáry (l_s) nejvýhodnější, budeme se nadále zabývat pouze měřením těchto toroidních vzorků.

3.4.1 Měření na toroidu

Metoda měření na toroidu je jedna z neznámějších a nejpropracovanějších metod měření vlastností feromagnetických materiálů. Obecný princip metody je již dlouhou dobu znám.

Měření na toroidu spočívá v tom, že na materiál zhotovený ve tvaru prstence je navinuto primární a sekundární vinutí. Primárním vinutím protéká nastavený proud, který ve vzorku vytváří požadovanou hodnotu intenzity pole H . V sekundárním vinutí se indukuje napětí, ze kterého je poté možno určit indukci B . Pokud jsou tyto veličiny porovnány v určitém časovém okamžiku, lze získat požadované magnetické vlastnosti – především BH a magnetovací charakteristiky. Z těchto charakteristik mohou být poté určovány další parametry (relativní permeabilita, koercitivní síla, remanentní magnetizace, velikost ztrát, atd.).



Obr. 15 – Schéma metody měření na toroidu

Jak již bylo uvedeno, magnetická intenzita H ve vzorku se určuje z budícího proudu a magnetická indukce B ve vzorku se určuje z indukovaného napětí.

- *intenzita magnetického pole ve vzorku*

$$H(t) = \frac{F_m}{l_{stř}} = \frac{N_1 \cdot i(t)}{l_{stř}} \quad (10)$$

- *indukce magnetického pole ve vzorku*

indukované napětí: $U_i = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (11)$

magnetický tok: $\Phi = \oint_S B \cdot ds$ prakticky: $\Phi = B \cdot S \quad (12)$

z výše uvedených vztahů poté platí:

$$\Delta B = \frac{\Delta\Phi}{N_2 \cdot S} = \frac{1}{N_2 \cdot S} \cdot \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt \quad (13)$$

Vznik nehomogenity pole ve vzorku

Přesnost určení skutečných magnetických vlastností vzorku nesouvisí pouze s přesností, jakou jsou stanoveny hodnoty intenzity a indukce, ale také s geometrií a rozměry vzorku.

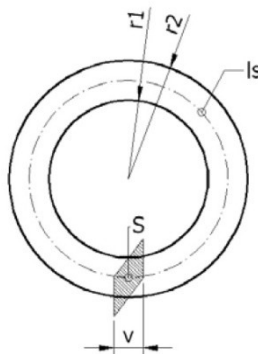
Intenzitu magnetického pole vzorku je pak možno určit na základě magnetizačního proudu ze vztahu:

$$H_{urč} = \frac{N_1 I_1}{l_s} \quad (14)$$

N_1 – počet závitů magnetovacího vinutí

I_1 – magnetovací proud

l_s – střední délka siločáry



Obr. 16 – Prstencový (toroidní) vzorek s obdélníkovým průřezem

Skutečná hodnota intenzity pole u toroidu s obdélníkovým průřezem je dána:

$$H_{skut-prum} = N_1 I_1 \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi(r_2-r_1)} \quad (15)$$

Pokud se však střední délku siločáry počítá ze vztahu $l_s = \pi(r_1 + r_2)$, vzniká chyba podle níže uvedené tabulky.

Tab. 15 - Vznik chyby při různých průměrech vzorku

r_2/r_1	1	1,2	1,5	2	3
$H_{skut-prum}/H_{urc}$	1,000	1,003	1,014	1,040	1,098
chyba (%)	0,0	-0,3	-1,4	-4,0	-9,8

Při měřeních, která slouží ke stanovení vlastností materiálů, se nedoporučuje poměr r_2/r_1 větší než 1,25 a to proto, že při velkém rozdílu vnitřního a vnějšího průměru vzniká navíc zkreslení charakteristiky způsobené různými pracovními body (a tím i různou permeabilitou) v jednotlivých vrstvách toroidu.

Další typ nehomogenity může vzniknout při nerovnoměrném rozložení magnetizačního vinutí. U vzorku s malou permeabilitou, který dobře nesoustřeďuje magnetický tok, je zapotřebí rozmístit vinutí rovnoměrně a dostatečně hustě. V opačném případě rozptylové toky způsobí nehomogenitu pole. Permeabilita vzorku také klesá u vysokofrekvenčního měření, nebo pokud materiál pracuje v oblasti nasycení.



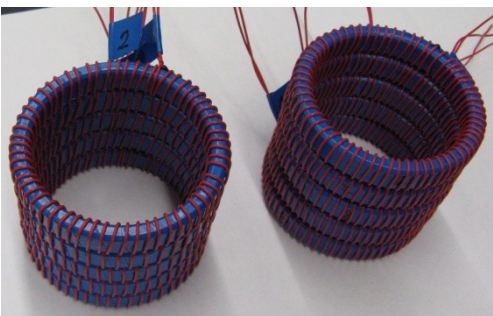
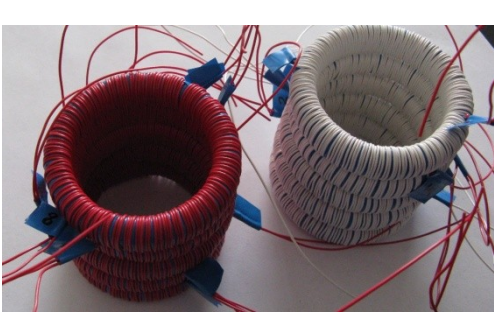
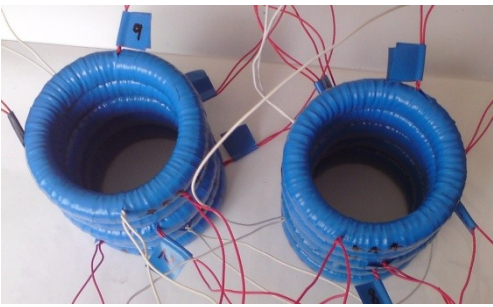
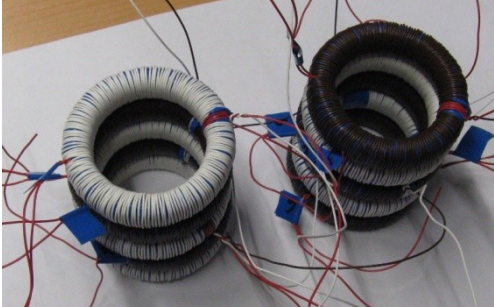
Při měření především na vyšších kmitočtech mohou vzniknout hrubé chyby (zejména na kmitočtech blízkých rezonančnímu kmitočtu f_r) vlivem mezizávitových parazitních kapacit, které spolu s indukčností vinutí tvoří rezonanční obvod.

Vzorky s malým demagnetizačním činitelem D mohou být stejnosměrně zmagnetovány i zemským magnetickým polem.

4 Analýza magnetických vlastností vzorků oceli určité třídy

4.1 Cíle měření

Cílem měření bylo zjistit homogenitu deseti vzorků oceli třídy 11 5XX. Měření bylo provedeno na přístroji Remagraph – C500, který za pomoci převodníkové multifunkční DAQ karty komunikuje s PC. Do software pro řízení REMA byly zadány vstupní parametry jednotlivých vzorků (vnitřní a vnější průměr vzorku, výška, počet závitů primárního a sekundárního vinutí, atd.). Po následném připojení budícího a měřícího vinutí k přístroji Remagraph – C500 si toto zařízení na základě vstupních dat automaticky odměřilo, vyhodnotilo hodnoty požadovaných veličin. Celý systém vykreslil v reálném čase grafy statických BH a magnetizačních charakteristik.

Vzorky ocelí	
Obr. 1 - Vzorky bez izolace	Obr. 2 - Vzorky opatřeny izolací
	
Obr. 3 - Měřící vinutí	Obr. 4 - První vrstva budícího vinutí
	
Obr. 5 - Izolace na první vrstvě bud. vinutí	Obr. 6 - Druhá vrstva budícího vinutí
	

4.2 Příprava vzorků

Vzorky oceli třídy 11 bylo třeba opatřit izolací izolační páskou. Poté následovalo motání sekundárního (měřicího vinutí). Jakmile bylo sekundární vinutí namotané, bylo třeba jej opět zaizolovat izolační páskou. Podobně jako sekundární vinutí se motala první vrstva primárního vinutí (budící vinutí) s tím rozdílem, že vnitřní průměr vzorku byl natěsno pokrytý drátem a vnější obvod pokrytý co nejrovnoměrěji. Poté bylo třeba vzorek opět omotat izolační páskou. Na izolaci opatřenou vrstvu už jen zbývalo namotat druhou vrstvu primárního vinutí, která se ještě předtím napájela na vrstvu první. Tato vrstva byla motaná ve směru první vrstvy primárního vinutí.

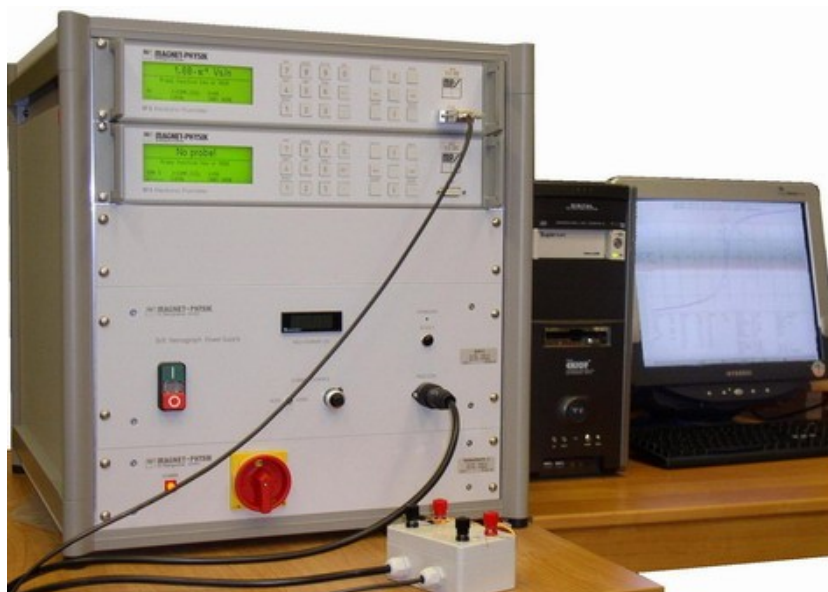
Tab. 16 - Počet závitů jednotlivých vrstev a lelektrický odpor vinutí

Číslo vzorku	Počet závitů				R [Ω]	
	primár	primár	primár	sekundár	primár	sekundár
	1. vrstva	2. vrstva	celkem			
1	171	167	338	61	1,8	0,6
2	173	160	333	49	1,8	0,6
3	178	165	343	54	1,8	0,6
4	170	164	334	54	1,8	0,6
5	182	164	346	57	1,8	0,6
6	172	160	332	64	1,7	0,6
7	181	165	346	69	1,8	0,6
8	174	168	342	68	1,8	0,6
9	179	164	343	71	1,8	0,6
10	174	164	338	68	1,8	0,6

Tab. 17 - Rozměry vzorků

Číslo vzorku	vnitřní průměr	vnější průměr	výška vzorku	střední délka siločáry	průřez vzorku
	d_1 [mm]	d_2 [mm]	v [mm]	$l_{stř}$ [mm]	S [mm ²]
1	60,00	69,93	10,00	204,09	49,65
2	60,11	69,95	9,97	204,30	49,05
3	60,02	69,94	10,01	204,14	49,65
4	59,99	69,90	10,02	204,03	49,65
5	60,01	69,94	10,00	204,13	49,65
6	59,98	69,92	10,01	204,05	49,75
7	60,02	69,92	10,01	204,11	49,55
8	60,00	69,96	10,00	204,14	49,80
9	60,00	69,92	10,02	204,08	49,70
10	59,99	69,93	10,02	204,08	49,80

4.3 Měřicí přístroj Remagraph – C500



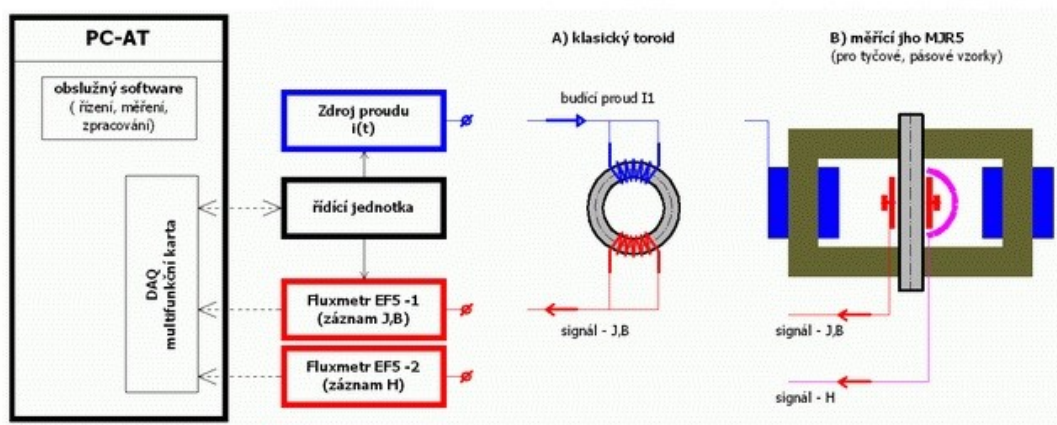
Obr. 17 – Měřicí přístroj Remagraph – C500

Základní popis měřicího přístroje:

Měřicí systém určený ke zjišťování stacionárních BH a magnetovacích charakteristik feromagneticky měkkých konstrukčních materiálů (oceli, plechy pro elektrotechniku, ferity, atd.).

Princip měření magnetických vlastností materiálů s tímto systémem je založen na obecné metodě měření na toroidu.

Magnetické vlastnosti lze pomocí tohoto měřicího systému určovat na uzavřených vzorcích s konstantním průřezem a definovatelnou střední siločarou. Vzorky mohou být vyrobeny z plného materiálu nebo vinuté (složené) z plechů.



Obr. 18 – Blokové schéma zapojení včetně měřeného vzorku

Základní Technické parametry:

Měřicí systém umožňuje měřit:

- BH charakteristiky (celé křivky)
- BH charakteristiky - magnetovací (pouze první kvadrant)
- Demagnetizace (nastavitelná, exponenciální sinusová, f_{max} 1Hz)

Nastavitelná rychlost měření – magnetování dB/dt (rychlostí změny budícího proudu I_1)

Nastavitelná velikost počátečního magnetického pole – předmagnetizace

Možnost nastavení mezních hodnot pro měření:

- intenzity pole H_{max}
- indukce pole B_{max} , J_{max}

Výkonový zesilovač (výstupní parametry): 320 VA; $\pm 40V$; $\pm 8A$

Provedení měřicího systému:

Základní části tohoto měřicího systému tvoří:

- Výkonový napájecí zdroj stejnosměrného proudu
- Elektronický fluxmetr - 1 (záznam signálu H)
- Elektronický fluxmetr - 2 (záznam signálu J , B)
- Řídící jednotka (synchronizace nastavení proudu a snímání veličin)
- multifunkční komunikační karta PC-PCI
- Software REMA pro řízení, vyhodnocení a zpracování měření a měřených dat (společně s PC)

Možné tvary vzorků pro měření:

Pro všechny typy vzorků určených pro měření jsou společné dva základní požadavky:

- a) aby vzorek měl konstantní a definovatelný průřez
- b) aby měl vzorek definovatelnou střední siločáru

Jak je naznačeno na obrázku s blokovým schématem, lze připojovat a měřit dva typy vzorků:

- vzorky klasické-uzavřené
- vzorky otevřené-tyčové (v případě užití speciálního jha)

Informace o tomto měřicím přístroji byly převzaty ze stránek katedry elektroenergetiky [8].

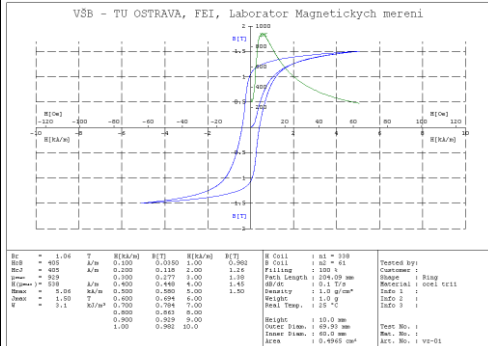
4.4 Vlastní měření

Postupně byly odměřeny BH charakteristiky pro B_{max} 0,5; 1 a 1,5 T a H_{max} 0,5; 1; 2; 5 a 10 kA/m. Poté byla měřena magnetovací charakteristika pro H_{max} 10 kA/m. Tyto charakteristiky je možno vidět na níže uvedených obrázcích pro jednotlivé vzorky.

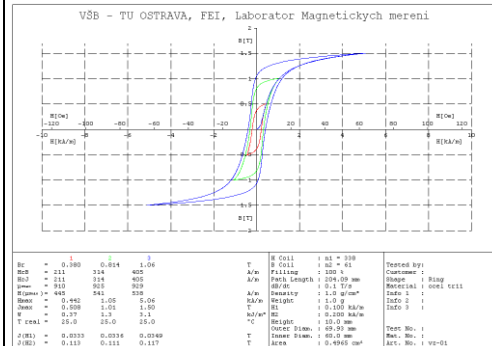
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 1

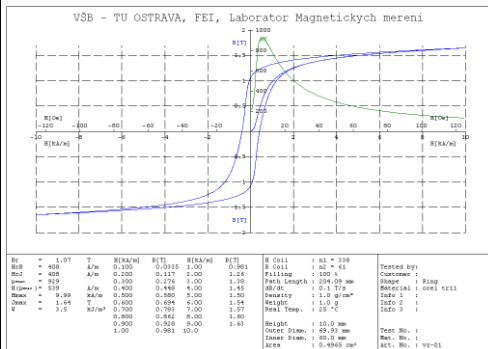
Obr. 1 - BH-charakteristika pro Bmax 1,5 T



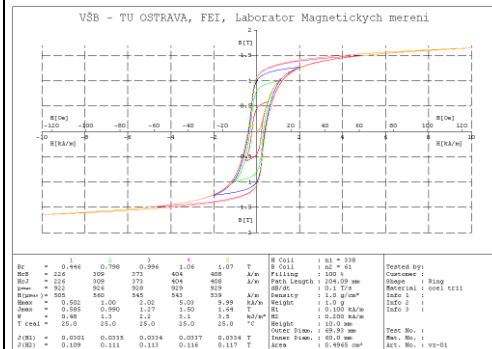
Obr. 2 - BH-charakteristika pro Bmax 0,5; 1; 1,5 T



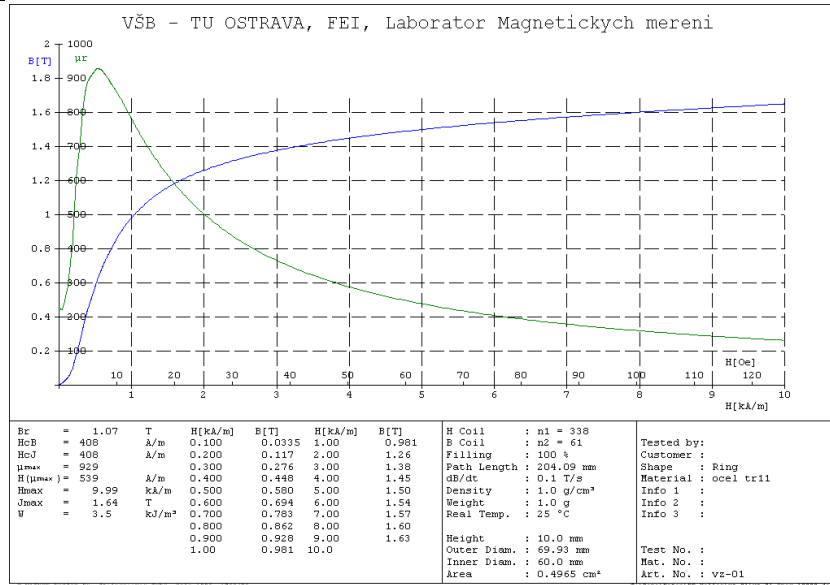
Obr. 3 - BH-charakteristika pro Hmax 10 kA/m



Obr. 4 - BH-charakteristika pro Hmax 0,5; 1; 2; 5; 10 kA/m



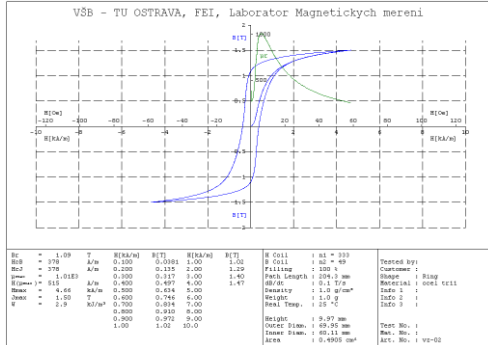
Obr. 5 - Magnetovací charakteristika pro Hmax 10 kA/m



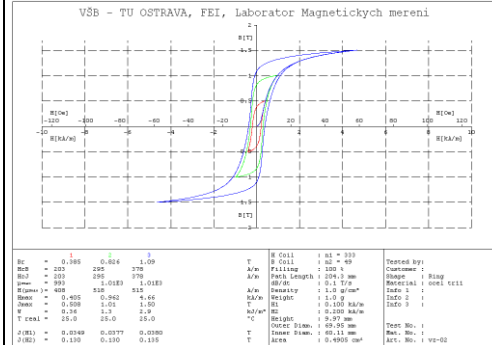
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 2

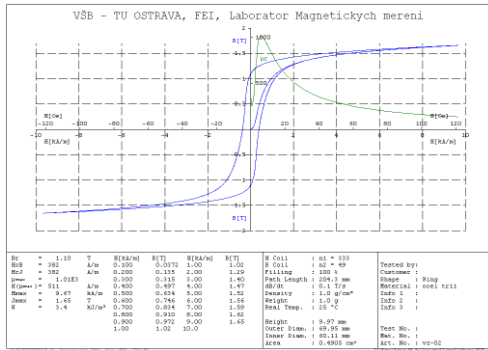
Obr. 1 - BH-charakteristika pro Bmax 1,5 T



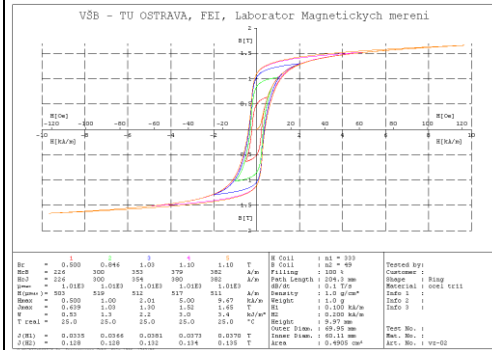
Obr. 2 - BH-charakteristika pro Bmax 0,5; 1; 1,5 T



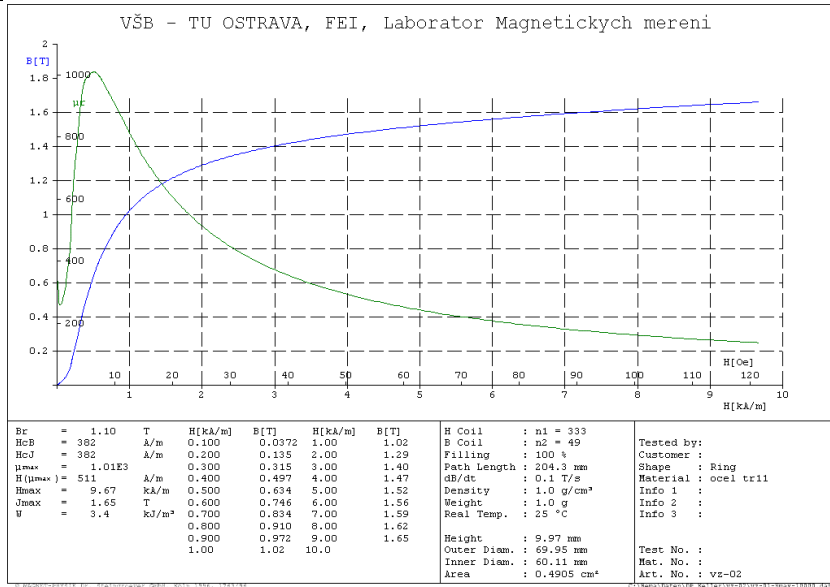
Obr. 3 - BH-charakteristika pro Hmax 10 kA/m



Obr. 4 - BH-charakteristika pro Hmax 0,5; 1; 2; 5; 10 kA/m



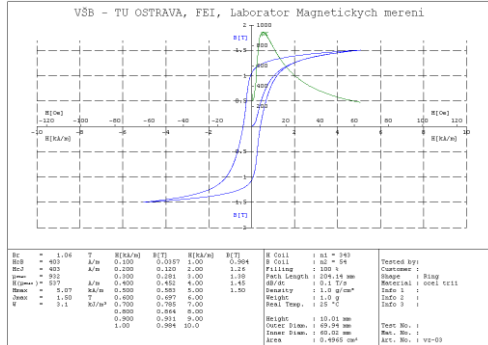
Obr. 5 - Magnetovací charakteristika pro Hmax 10 kA/m



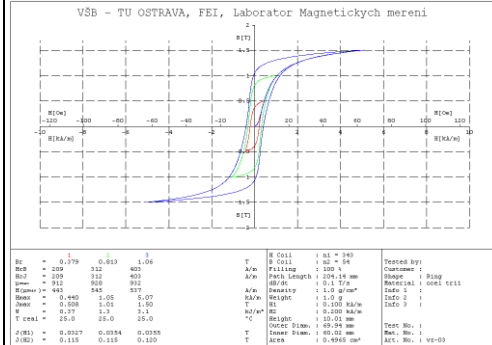
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 3

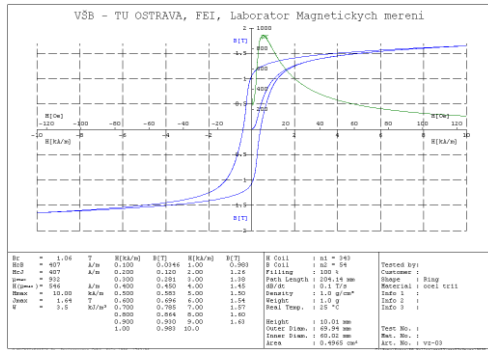
Obr. 1 - BH-charakteristika pro Bmax 1,5 T



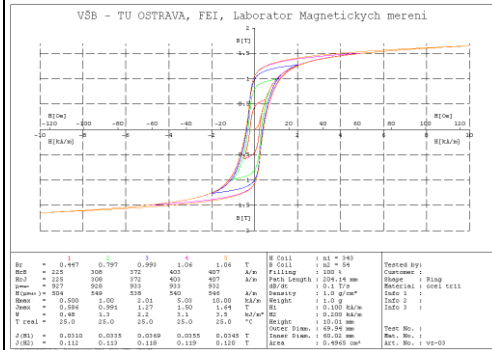
Obr. 2 - BH-charakteristika pro Bmax 0,5; 1; 1,5 T



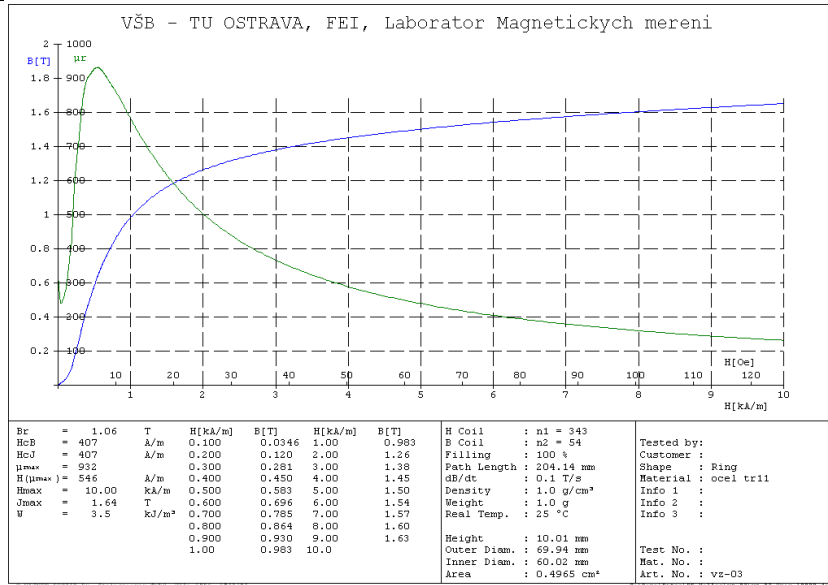
Obr. 3 - BH-charakteristika pro Hmax 10 kA/m



Obr. 4 - BH-charakteristika pro Hmax 0,5; 1; 2; 5; 10 kA/m



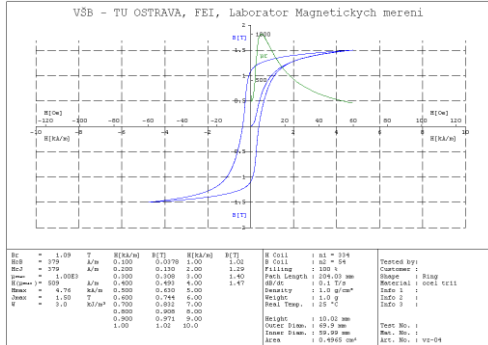
Obr. 5 - Magnetovací charakteristika pro Hmax 10 kA/m



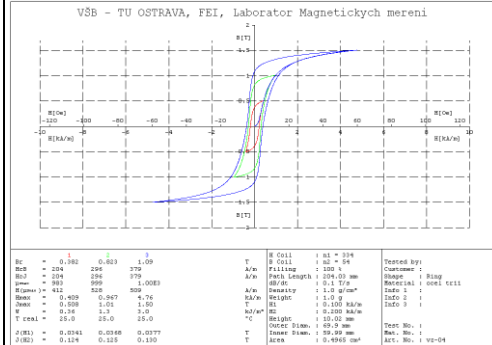
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 4

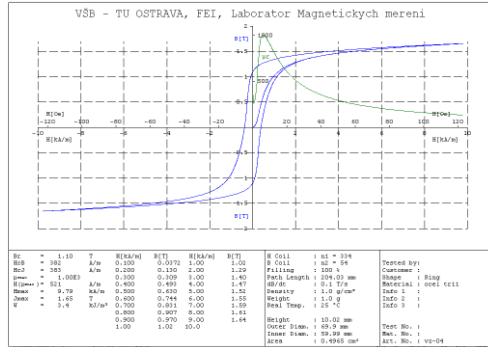
Obr. 1 - BH-charakteristika pro Bmax 1,5 T



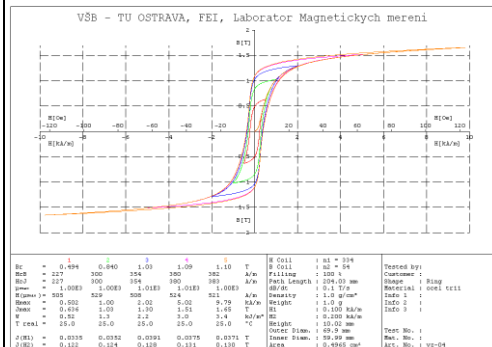
Obr. 2 - BH-charakteristika pro Bmax 0,5; 1; 1,5 T



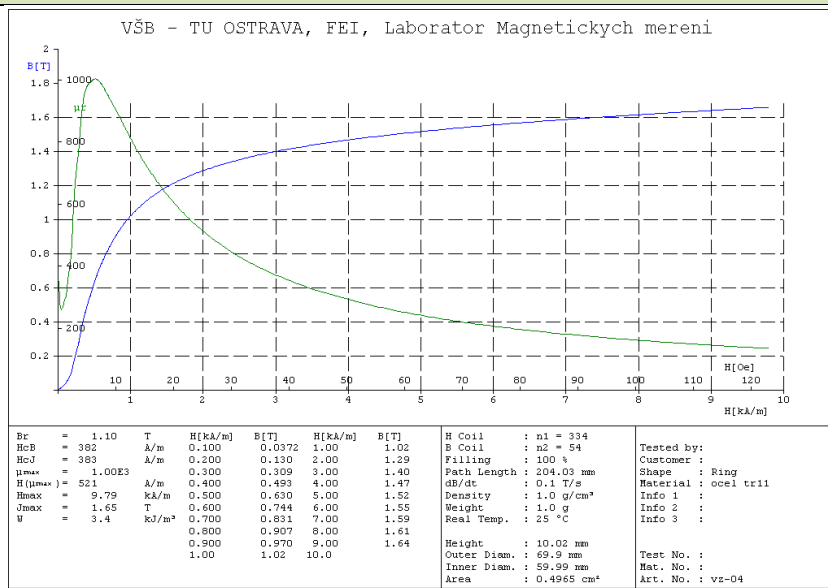
Obr. 3 - BH-charakteristika pro Hmax 10 kA/m



Obr. 4 - BH-charakteristika pro Hmax 0,5; 1; 2; 5; 10 kA/m



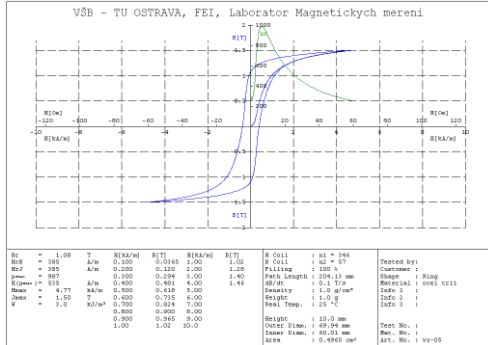
Obr. 5 - Magnetovací charakteristika pro Hmax 10 kA/m



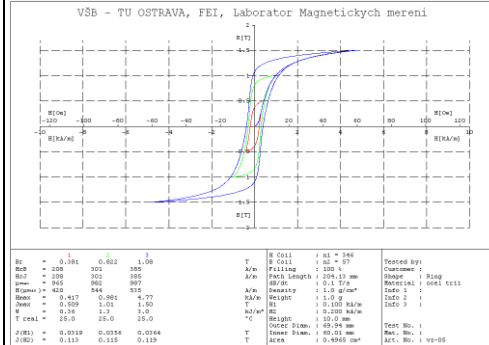
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 5

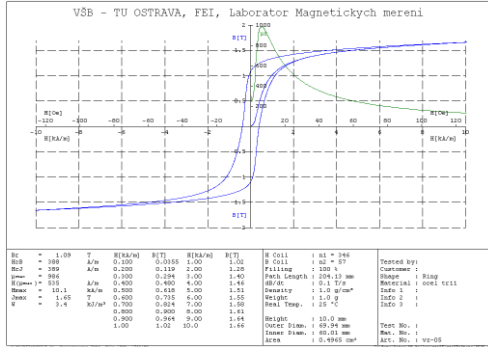
Obr. 1 - BH-charakteristika pro Bmax 1,5 T



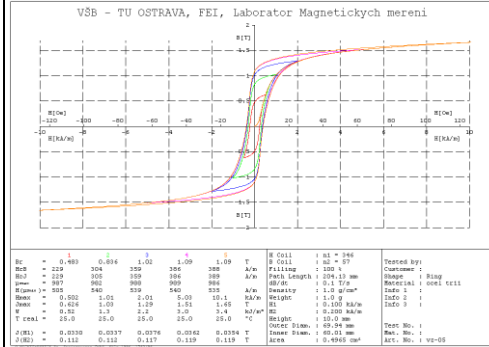
Obr. 2 - BH-charakteristika pro Bmax 0,5; 1; 1,5 T



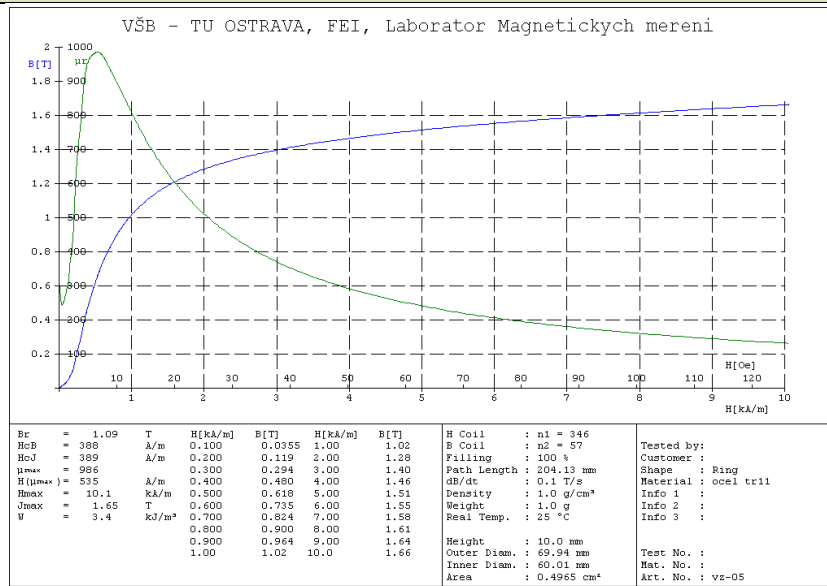
Obr. 3 - BH-charakteristika pro Hmax 10 kA/m



Obr. 4 - BH-charakteristika pro Hmax 0,5; 1; 2; 5; 10 kA/m



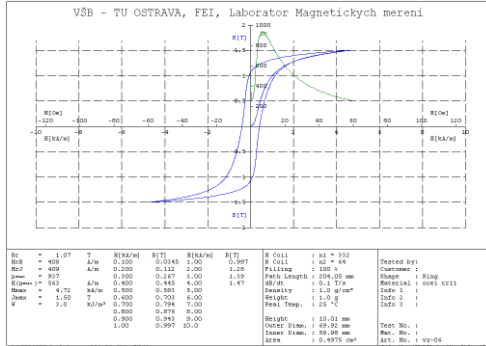
Obr. 5 - Magnetovací charakteristika pro Hmax 10 kA/m



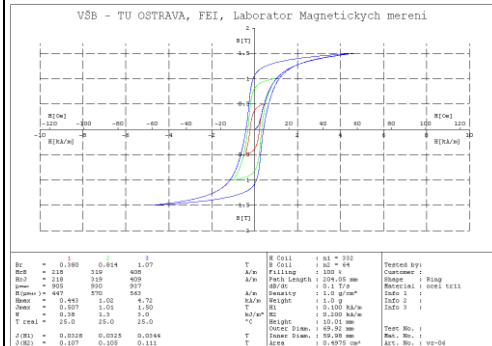
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 6

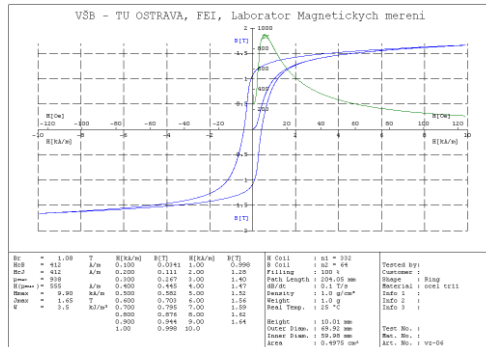
Obr. 1 - BH-charakteristika pro Bmax 1,5 T



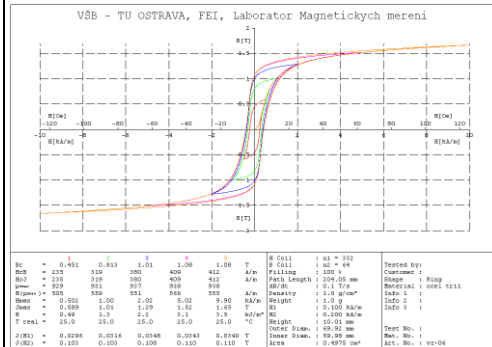
Obr. 2 - BH-charakteristika pro Bmax 0,5; 1; 1,5 T



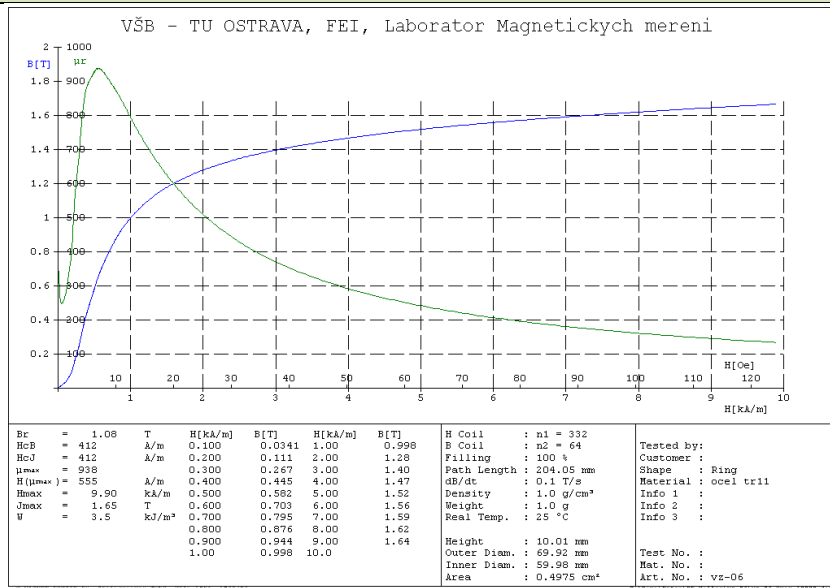
Obr. 3 - BH-charakteristika pro Hmax 10 kA/m



Obr. 4 - BH-charakteristika pro Hmax 0,5; 1; 2; 5; 10 kA/m



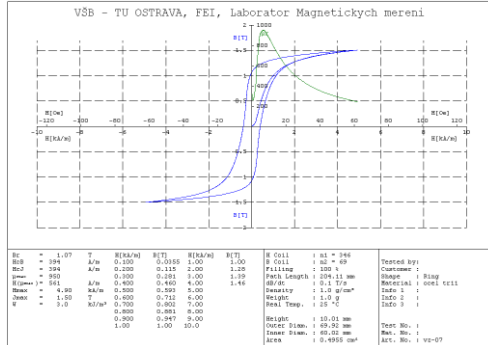
Obr. 5 - Magnetovací charakteristika pro Hmax 10 kA/m



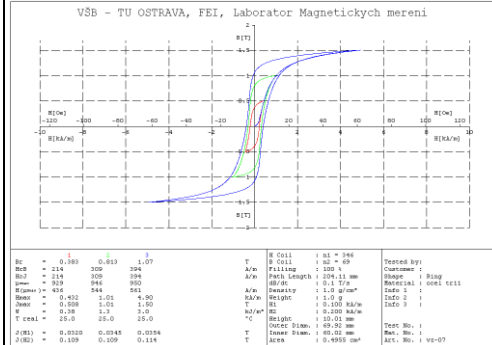
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 7

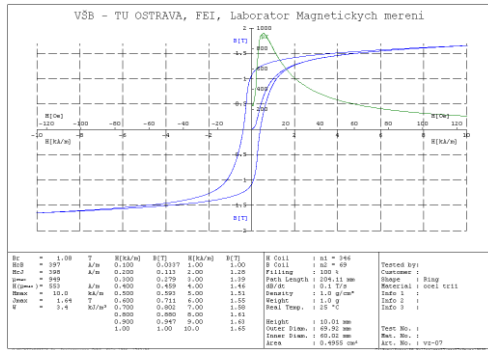
Obr. 1 - BH-charakteristika pro Bmax 1,5 T



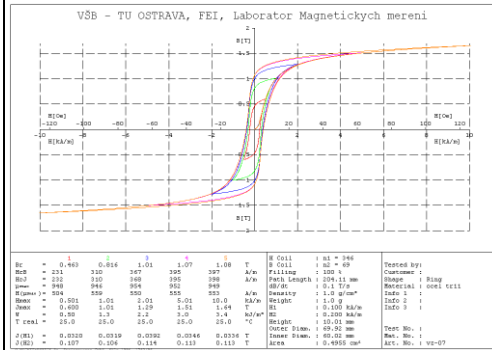
Obr. 2 - BH-charakteristika pro Bmax 0,5; 1; 1,5 T



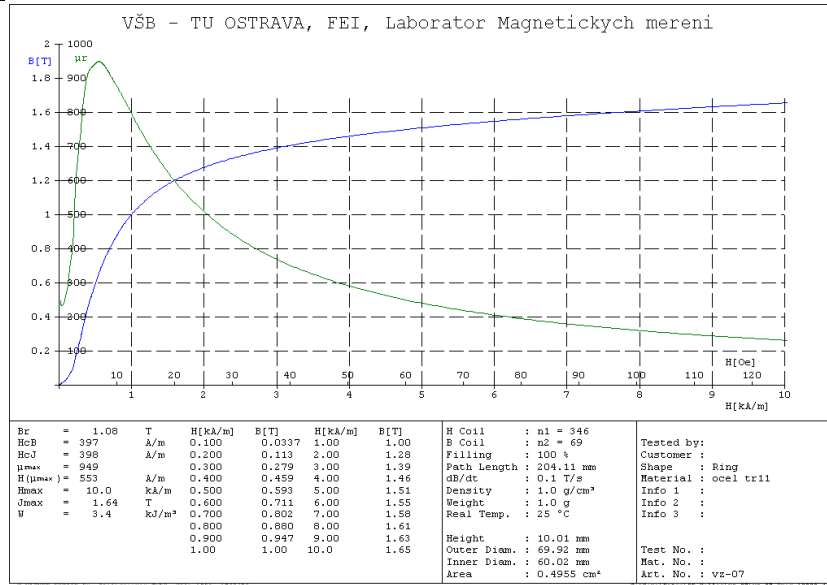
Obr. 3 - BH-charakteristika pro Hmax 10 kA/m



Obr. 4 - BH-charakteristika pro Hmax 0,5; 1; 2; 5; 10 kA/m



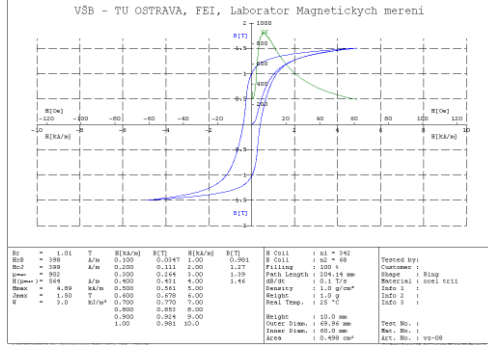
Obr. 5 - Magnetovací charakteristika pro Hmax 10 kA/m



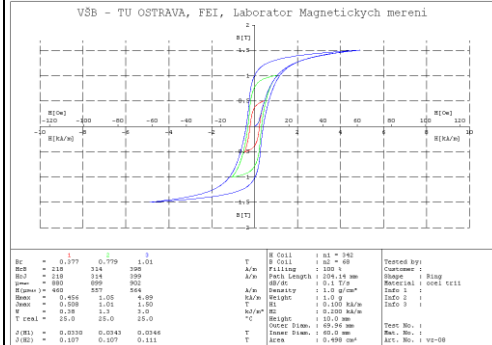
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 8

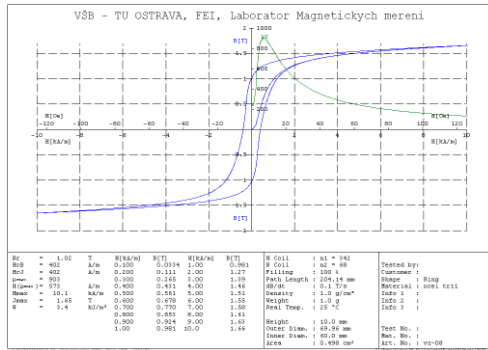
Obr. 1 - BH-charakteristika pro Bmax 1,5 T



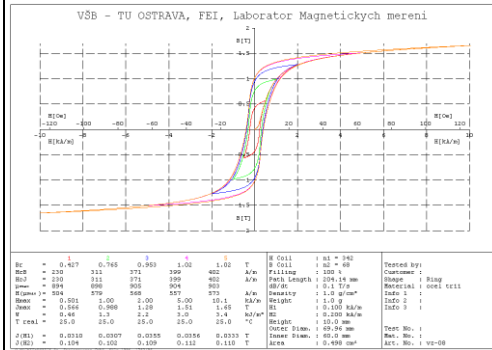
Obr. 2 - BH-charakteristika pro Bmax 0,5; 1; 1,5 T



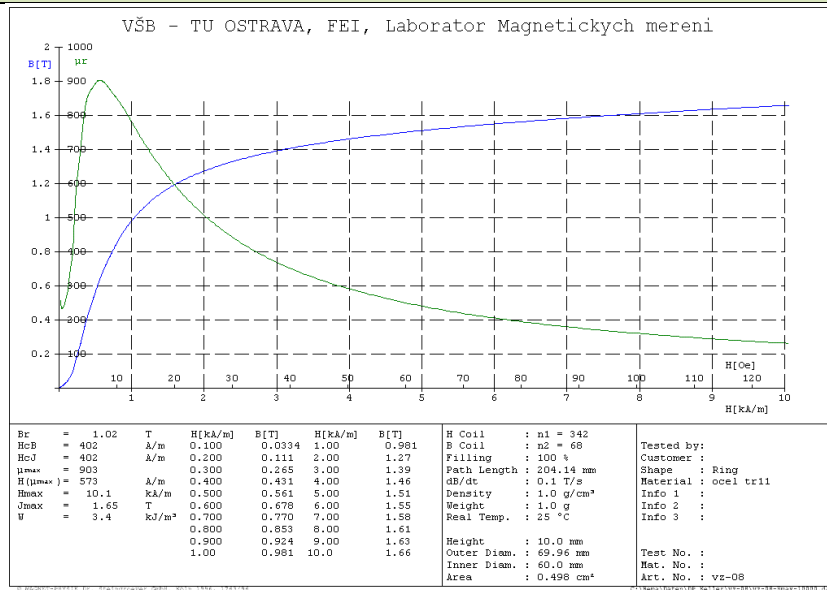
Obr. 3 - BH-charakteristika pro Hmax 10 kA/m



Obr. 4 - BH-charakteristika pro Hmax 0,5; 1; 2; 5; 10 kA/m



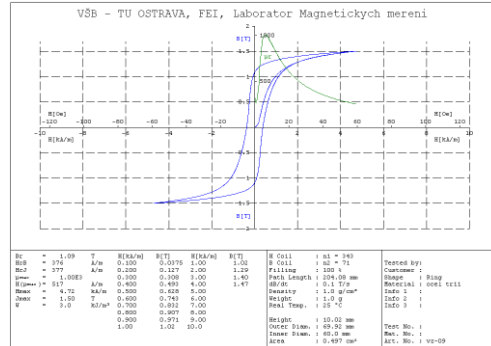
Obr. 5 - Magnetovací charakteristika pro Hmax 10 kA/m



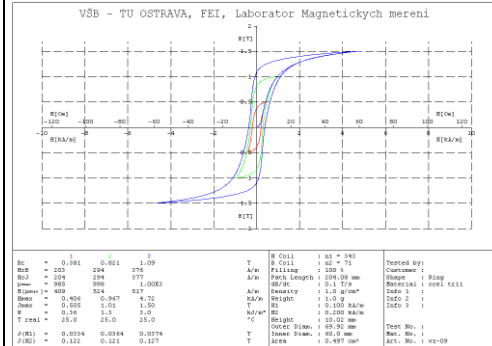
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 9

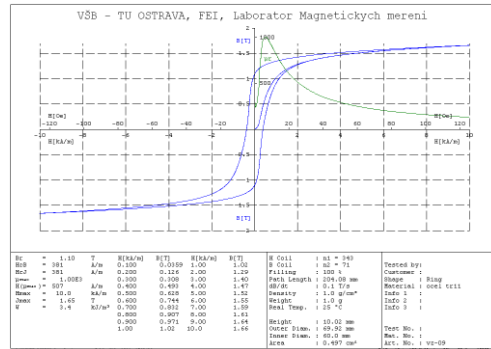
Obr. 1 - BH-charakteristika pro Bmax 1,5 T



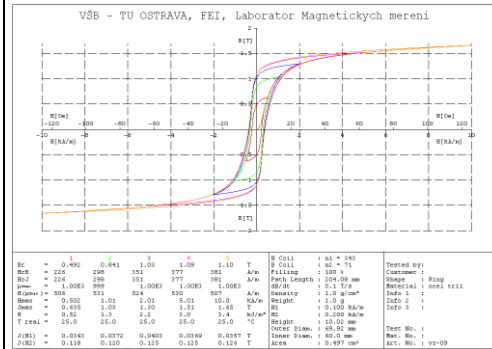
Obr. 2 - BH-charakteristika pro Bmax 0,5; 1; 1,5 T



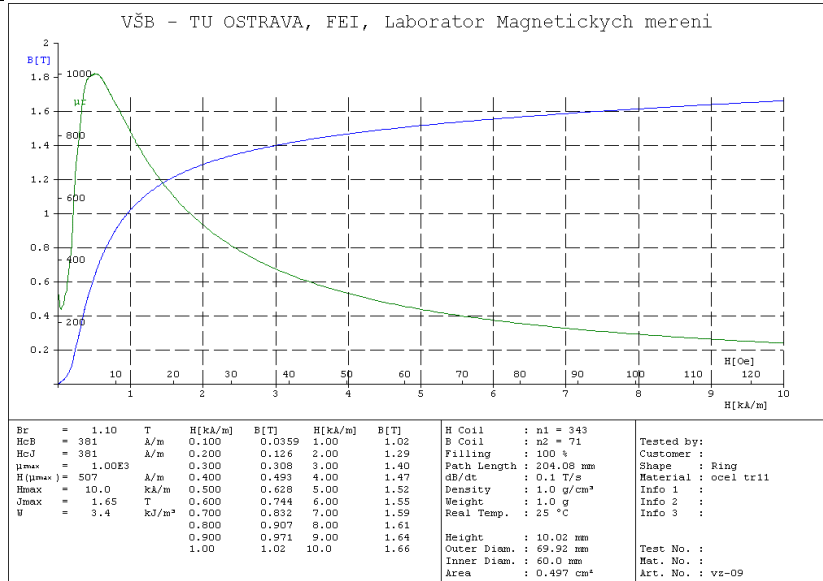
Obr. 3 - BH-charakteristika pro Hmax 10 kA/m



Obr. 4 - BH-charakteristika pro Hmax 0,5; 1; 2; 5; 10 kA/m



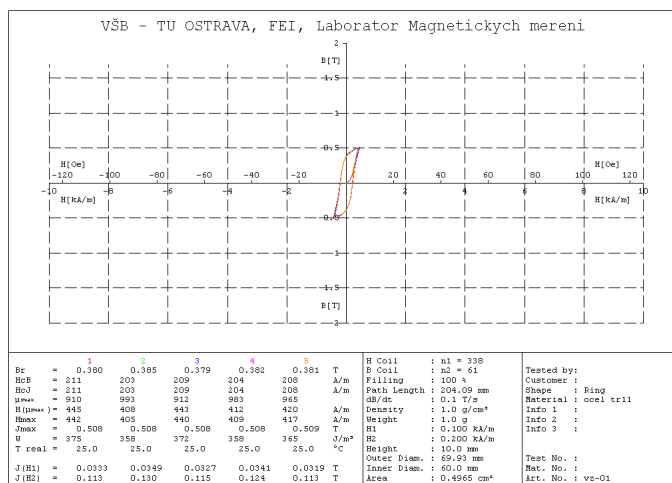
Obr. 5 - Magnetovací charakteristika pro Hmax 10 kA/m



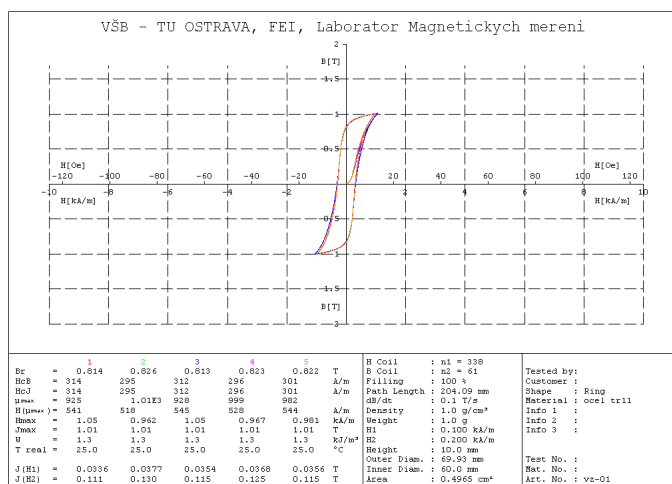
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 1, 2, 3, 4, 5

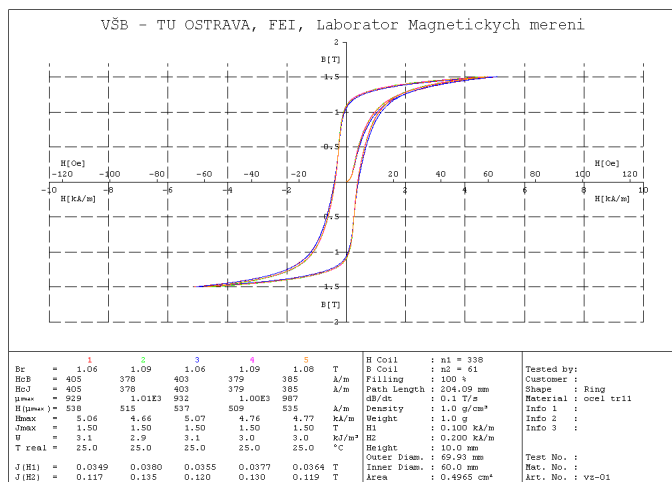
Obr. 1 - BH-charakteristiky vybraných vzorků pro Bmax 0,5 T



Obr. 2 - BH-charakteristiky vybraných vzorků pro Bmax 1 T



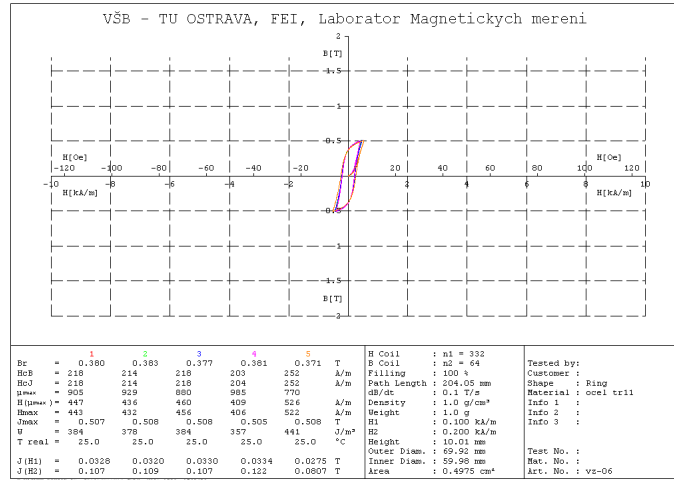
Obr. 3 - BH-charakteristiky vybraných vzorků pro Bmax 1,5 T



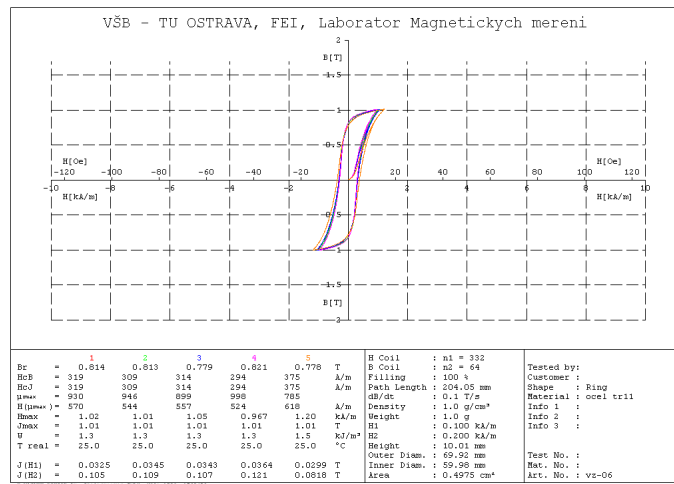
Přehled naměřených hodnot

Vzorek č. 6, 7, 8, 9, 10

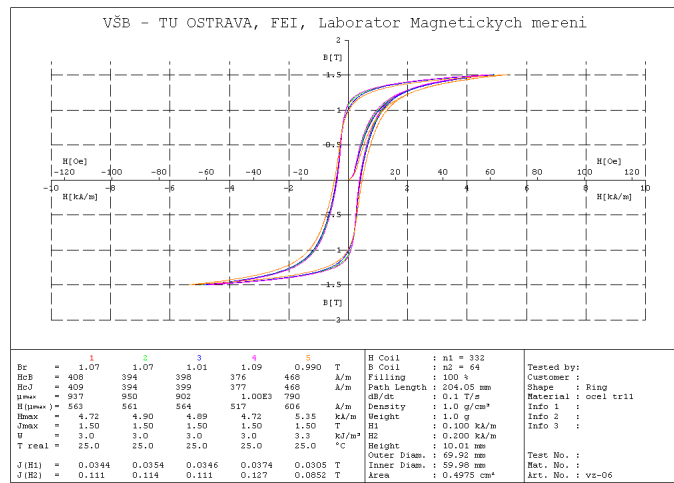
Obr. 1 - BH-charakteristiky vybraných vzorků pro Bmax 0,5 T



Obr. 2 - BH-charakteristiky vybraných vzorků pro Bmax 1 T



Obr. 3 - BH-charakteristiky vybraných vzorků pro Bmax 1,5 T



Naměřené hodnoty z těchto charakteristik jsem následně zpracoval do grafů, aby bylo možné posoudit homogenitu vzorků. Poté jsem u měření při B_{\max} 0,5; 1 a 1,5 T posuzoval tyto parametry jednotlivých vzorků - remanence, koercitivní síla, maximální permeabilita, maximální intenzita pole a ztrátové číslo.

Tab. 18 - Naměřené hodnoty při B_{\max} 0,5 T

	B_r	H_{cB}	μ_{\max}	H_{\max}	W
Číslo vzorku	[T]	[A/m]	[-]	[kA/m]	[kJ/m ³]
1	0,38	211	910	0,44	0,37
2	0,39	203	993	0,41	0,36
3	0,38	209	912	0,44	0,37
4	0,38	204	983	0,41	0,36
5	0,38	208	965	0,42	0,36
6	0,38	218	905	0,44	0,38
7	0,38	214	929	0,43	0,38
8	0,38	218	880	0,46	0,38
9	0,38	203	985	0,41	0,36
10	0,37	252	770	0,52	0,44
stř. hodnota	0,38	214	923	0,44	0,38

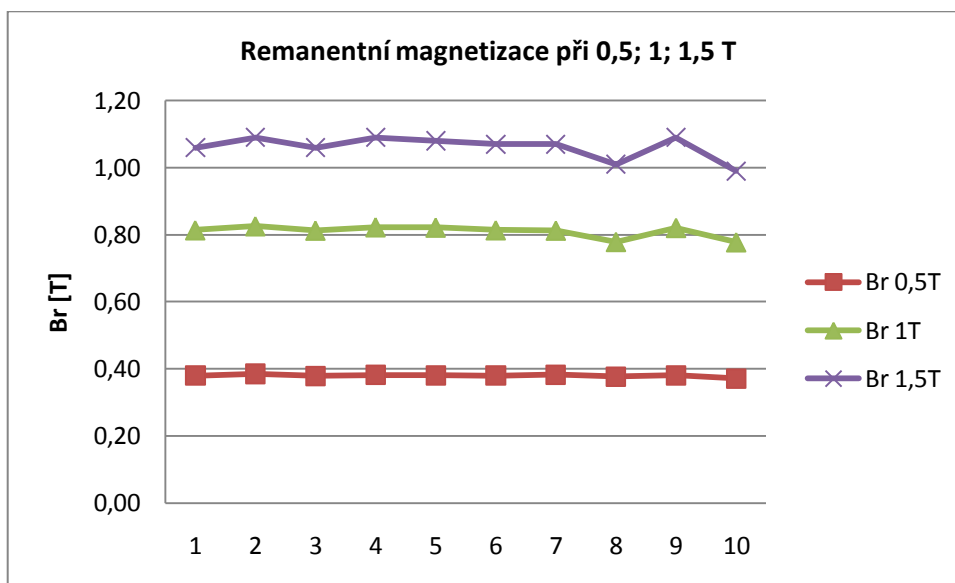
Tab. 19 - Naměřené hodnoty při B_{\max} 1 T

	B_r	H_{cB}	μ_{\max}	H_{\max}	W
Číslo vzorku	[T]	[A/m]	[-]	[kA/m]	[kJ/m ³]
1	0,81	314	925	1,05	1,30
2	0,83	295	1010	0,96	1,30
3	0,81	312	928	1,05	1,30
4	0,82	296	999	0,97	1,30
5	0,82	301	982	0,98	1,30
6	0,81	319	930	1,02	1,30
7	0,81	309	946	1,01	1,30
8	0,78	314	899	1,05	1,30
9	0,82	294	998	0,97	1,30
10	0,78	375	785	1,20	1,50
stř. hodnota	0,81	313	940	1,03	1,32

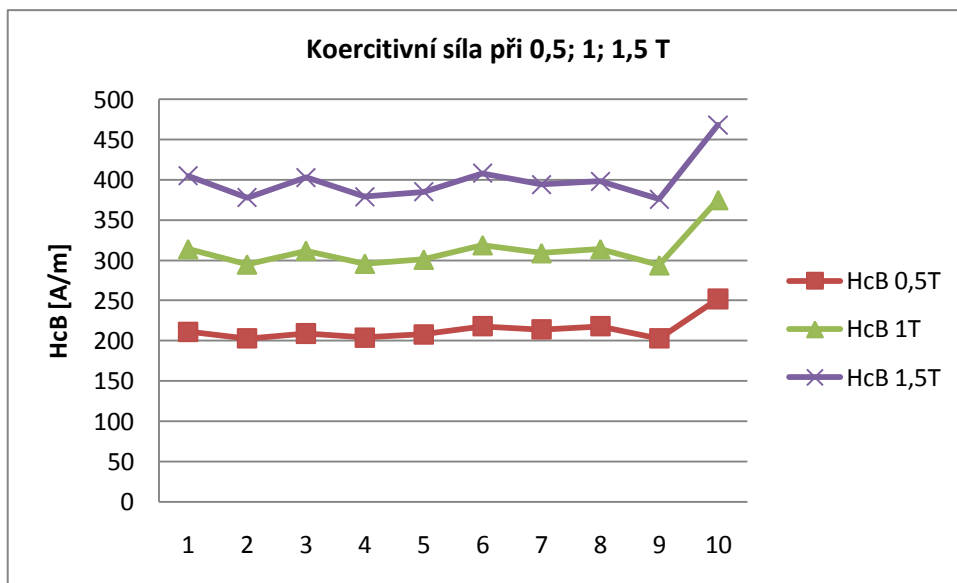
Tab. 20 - Naměřené hodnoty při $B_{\max} 1,5 \text{ T}$

	B_r	H_{cB}	μ_{\max}	H_{\max}	W
Číslo vzorku	[T]	[A/m]	[-]	[kA/m]	[kJ/m ³]
1	1,06	405	929	5,06	3,10
2	1,09	378	1010	4,66	2,90
3	1,06	403	932	5,07	3,10
4	1,09	379	1000	4,76	3,00
5	1,08	385	987	4,77	3,00
6	1,07	408	937	4,72	3,00
7	1,07	394	950	4,90	3,00
8	1,01	398	902	4,89	3,00
9	1,09	376	1000	4,72	3,00
10	0,99	468	790	5,35	3,30
stř. hodnota	1,06	399	944	4,89	3,04

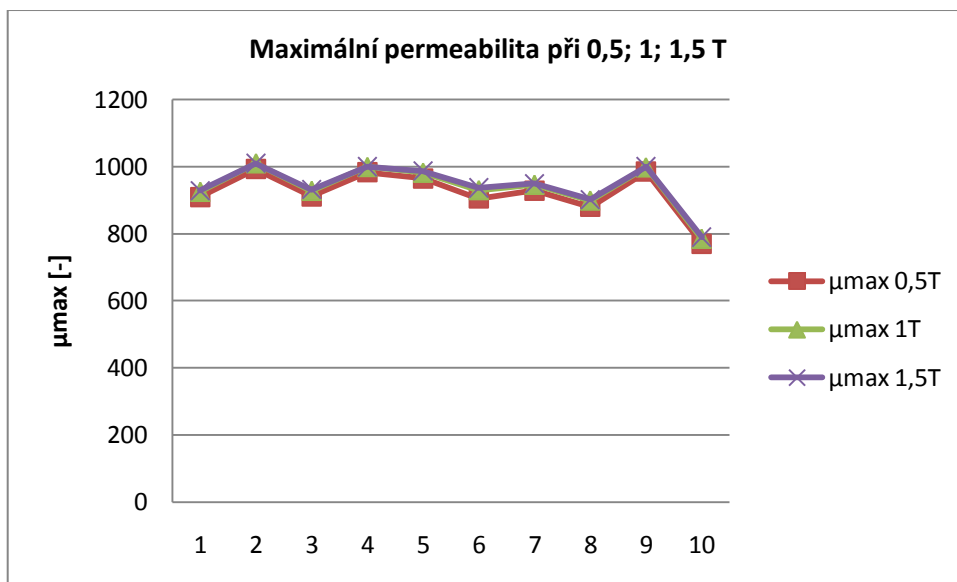
Výše zmíněné parametry jsem vynesl do grafů pro lepší přehlednost. Z těchto grafů je zřejmé, že parametry jednotlivých vzorků se od sebe liší jen minimálně, pouze vzorek č. 10 se poněkud odchyluje trochu více a to téměř u všech parametrů. Zbývajících 9 vzorků oceli 11 5XX můžeme považovat za homogenní.



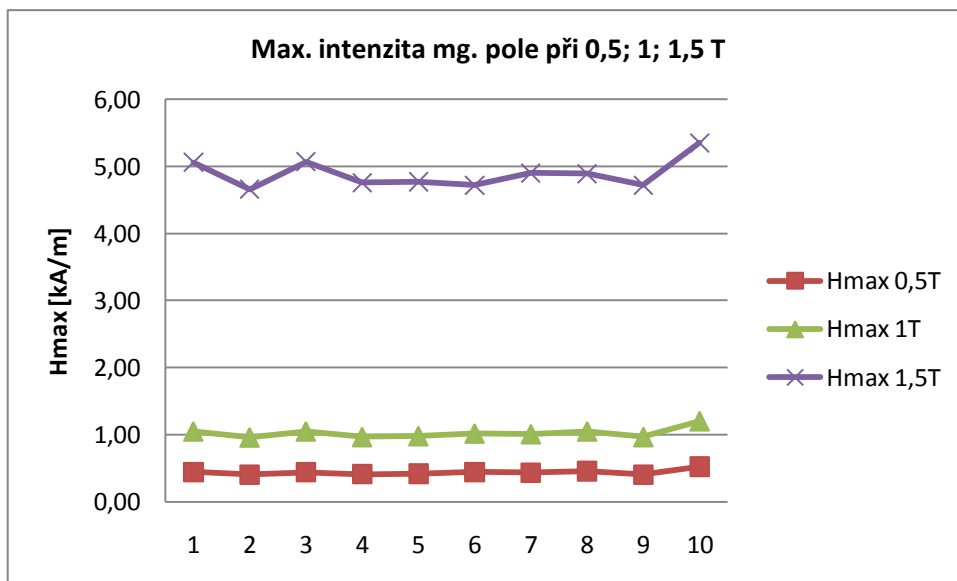
Obr. 19 – Remanentní magnetizace jednotlivých vzorků při $B_{r_{\max}} 0,5; 1$ a $1,5 \text{ T}$



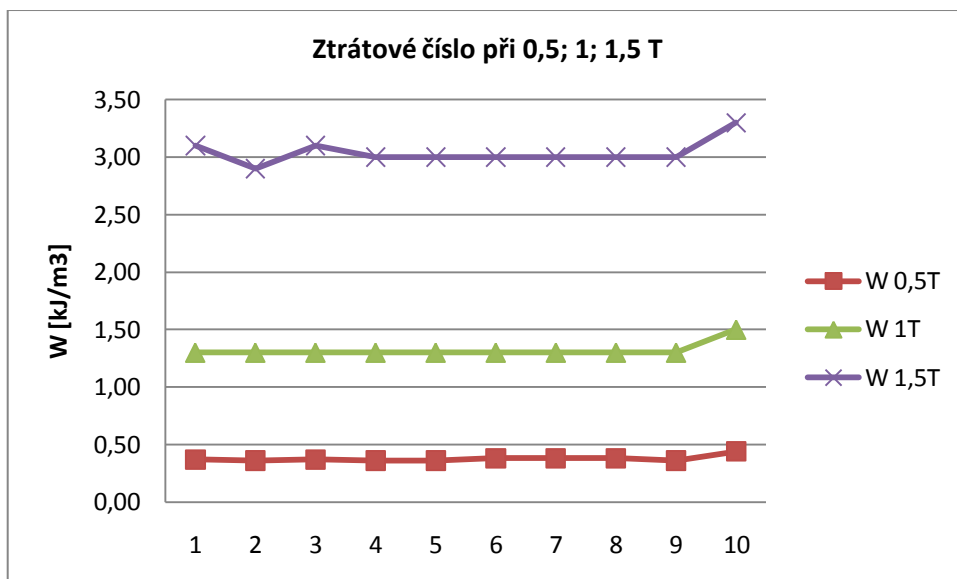
Obr. 20 – Koercitivní síla jednotlivých vzorků při Br_{max} 0,5; 1 a 1,5 T



Obr. 21 – Maximální permeabilita jednotlivých vzorků při Br_{max} 0,5; 1 a 1,5 T



Obr. 22 – Maximální intenzita mg. pole jednotlivých vzorků při Br_{max} 0,5; 1 a 1,5 T



Obr. 23 – Hysterezní ztráty jednotlivých vzorků při Br_{max} 0,5; 1 a 1,5 T

Výše uvedené obrázky BH a magnetizačních charakteristik jsou jen názorné. V plném rozlišení se nacházejí v příloze této práce. Veškeré tabulky a grafy byly zpracovány v MS Excel 2007.

5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo především analyzovat skutečné magnetické vlastnosti určité oceli typové ČSN a dále pak posoudit homogenitu tohoto materiálu na deseti vzorcích této oceli vyrobených z ingotu jedné tavby. Jedná se o ocel třídy 11 5XX.

Při této práci jsem si obohatil znalosti z oblasti konstrukčních ocelí (především nelegovaných konstrukčních ocelí třídy 10, 11 a 12). Získal jsem se mnoho důležitých informací o jejich struktuře, chemickém složení a o mechanických či fyzikálních vlastnostech. Dále jsem si rozšířil obzory v oblasti tepelného zpracování oceli, hlavně potom v žití oceli a využití diagramů IRA a ARA. Také jsem získal přehled o některých magneticky měkkých a tvrdých materiálech a o metodách měření feromagnetických materiálů, zvláště pak v měření na toroidu.

Časově nejnáročnějším úkolem byla zřejmě příprava jednotlivých vzorků, zvláště pak navinutí první a druhé vrstvy budícího vinutí, kvůli většímu počtu závitů. Samotné měření pak bylo provedeno v průběhu jednoho dne. Toto měření pro mě bylo velice přínosné, neboť jsem díky němu mohl své teoretické poznatky uplatnit v praxi.

6 Použitá literatura

- [1] Hassdenteufel, J.: *Elektrotechnické materiály*, ALFA, Bratislava 1978
- [2] Fremunt, P., Podrábský, T.: *Konstrukční oceli*, CERM, Brno 1996
- [3] Jech, J.: *Tepelné zpracování oceli*, SNTL, Praha 1983
- [4] Silbernagel, A.: *Nauka o materiálu I*, VŠB-TUO, Ostrava 1982
- [5] Draxler, K., Kašpar, P., Ripka, P.: *Magnetické prvky a měření*, ČVUT, Praha 2008
- [6] Marek, M.: *Způsoby zjišťování magnetických vlastností konstrukčních materiálů, specifické příklady užití a aplikací magnetických měření*, Disertační práce, VŠB-TUO, Ostrava 2005
- [7] Trnka, Z., Dufek, M.: *Magnetická měření*, SNTL, Praha 1964
- [8] *Stránky katedry elektroenergetiky* - <http://fei.vsb.cz/>

7 Seznam příloh

Přílohy na CD:

Složka – Výsledky stacionárního měření:

1. Vzorek č. 1
2. Vzorek č. 2
3. Vzorek č. 3
4. Vzorek č. 4
5. Vzorek č. 5
6. Vzorek č. 6
7. Vzorek č. 7
8. Vzorek č. 8
9. Vzorek č. 9
10. Vzorek č. 10
11. Porovnání vzorků č. 1, 2, 3, 4, 5
12. Porovnání vzorků č. 6, 7, 8, 9, 10